

AALTO-YLIOPISTO

Insinööritieteiden korkeakoulu

Energiatekniikan laitos

Jesse Kantola

SYRJÄYTTÄVÄLLÄ ILMANJAOLLA TOTEUTETUN ILMASTOINTIKONEEN KÄYTTÖ LUOKKATILOISSA

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten
28.06.2012 Espoossa.

Työn tarkastaja: Professori Kai-Erik Sirén

Työn ohjaaja: Diplomi-insinööri Asko Laune

AALTO-YLIOPISTO PL 11000, 00076 Aalto http://www.aalto.fi		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Jesse Kantola			
Työn nimi: Syrjäyttävällä ilmanjaolla toteutetun ilmastointikoneen käyttö luokkatiloissa			
Korkeakoulu: Insinööritieteiden korkeakoulu			
Laitos: Energiatekniikan laitos			
Professuuri: Ene-58 LVI-Tekniikka		Koodi: K3008	
Työn valvoja: Professori Kai-Erik Sirén			
Työn ohjaaja: Diplomi-insinööri Asko Laune			
Tiivistelmä: Diplomityön tavoitteena on selvittää luokkatilaan sijoitettavan ilmastointikoneen soveltuvuutta koululuokan ilmanvaihtoratkaisuksi ilmastointikoneen aikaansaamien sisäilmasto-olosuhteiden ja ilmanvaihtojärjestelmästä aiheutuvien kustannusten perusteella. Työn alussa esitellään rakentamismääräysten ja Sisäilmastoluokitus 2008:n mukaisia vaatimuksia sisäilmastolle. Koulujen sisäilmasto-ongelmia Suomessa ja ulkomailla käsitellään kirjallisuustutkimuksessa. Työssä esitellään sekoittavan ja syrjäyttävän ilmanjaon periaatteet sekä ilmanvaihtoon liittyviä indeksejä. Lisäksi tutkimuksessa esitellään kirjallisuustutkimuksessa aikaisempia tutkimuksia liittyen ilmanjakotapoihin ja niiden tehokkuuteen. Työn tärkeimmässä osuudessa esitellään kahdessa koululuokassa tehtyjen kenttämittausten tulokset ja niiden tarkastelu, sekä eri ilmastointijärjestelmien laskennallinen energiankulutus- ja elinkaarikustannusvertailu. Työssä saatujen tulosten perusteella tilakohtainen ilmastointikone soveltuu luokkatilan ilmanvaihtoratkaisuksi. Tilakohtaista ilmastointikoneetta käytettäessä on kuitenkin huomioitava ilmanjakolaitteen lähivyöhyke työpisteiden sijoittelussa. Tilakohtainen ilmastointikone soveltuu ratkaisuksi etenkin kohteisiin, joissa tarvitaan pikaisia toimenpiteitä huonosta sisäilmasta johtuviin ongelmiin. Tilakohtaisilla ilmastointikoneilla ratkaistussa hajautetussa järjestelmässä energiankulutus oli pienempi kuin keskitetyssä järjestelmässä tai koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä. Elinkaarikustannukset olivat hajautetussa järjestelmässä kuitenkin suurimmat.			
Päivämäärä: 28.6.2012		Kieli: Suomi	
		Sivumäärä: 122 + 15	
Avainsanat: ilmastointikone, ilmanjakotapa, syrjäytysilmanvaihto, koulujen sisäilmasto, energian kulutus, ilmanvaihtojärjestelmän kustannukset			

AALTO-UNIVERSITY PO Box 1100, FI-00076 Aalto http://www.aalto.fi		ABSTRACT OF MASTER'S THESIS	
Author: Jesse Kantola			
Title: Using an air-handling unit with displacement ventilation in classrooms			
School: School of Engineering			
Department: Department of Energy Technology			
Professorship: Ene-58 Heating, Ventilating and Air-Conditioning Technology		Code: K3008	
Supervisor: Professor Kai-Erik Sirén Instructor: Asko Laune M.Sc. (Tech.)			
<p>Abstract:</p> <p>The objective of this master's thesis is to solve whether an air handling unit that is installed in a classroom is a good ventilation method for the classroom environment. This is solved by examining the indoor air quality and the costs of the ventilation system.</p> <p>At the beginning of the thesis the requirements for the indoor environment of the Finnish building code and Classification of Indoor Environment 2008 are introduced. The indoor environment problems in schools in Finland and elsewhere in the world are reviewed in the literature research. The principles of mixing and displacement ventilation and indexes related to ventilation are introduced in the thesis. In the literature research previous studies about air distribution methods and their efficiency are introduced. In the most important part of the thesis the results of the indoor environment measurements in two classrooms as well as the results of the comparison between different ventilation systems' energy use and life-cycle costs are introduced and analysed.</p> <p>The results of the thesis suggest that an air handling unit installed in a classroom is suitable solution for a classroom ventilation method. The near zone of the air distribution unit has to be taken into consideration when placing the school desks. The air handling unit that is installed in the classroom is especially suitable for buildings that need rapid actions to solve the problems caused by poor indoor environment. The energy use of the decentralized ventilation system with the air handling units installed in the classrooms were lower than in the centralized ventilation system or mechanical exhaust ventilation system. However the life-cycle costs were highest in the decentralized system.</p>			
Date: 28.6.2012		Language: Finnish	
		Number of pages: 122 + 15	
Keywords: air-handling unit, air distribution, displacement ventilation, indoor environment in schools, energy use, cost of ventilation system			

ALKUSANAT

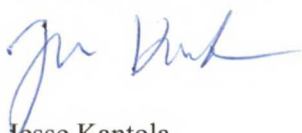
Tämä tutkimus on tehty opinnäytteenä diplomi-insinöörin tutkintoa varten Aalto yliopiston teknillisen korkeakoulun LVI-tekniikan pääaineeseen. Diplomityö on tehty Helsingin kaupungille, joka tilasi työn Vahanen-yhtiöltä. Työn ohjaajana toimi diplomi-insinööri Asko Laune ja valvojana professori Kai Sirén.

Haluan kiittää Helsingin kaupunkia ja Vahanen-yhtiötä mielenkiintoisen diplomityöaiheen tarjoamisesta. Asko Launetta haluan kiittää työn ohjaamisesta. Muut kiitokset diplomityöhön liittyen kuuluvat kaikille henkilöille, jotka ovat auttaneet prosessin aikana. Näistä henkilöistä mainittakoon erityisesti Vahanen-yhtiöistä Ari-Veikko Kettunen, jonka asiantuntemus auttoi muun muassa mittausten valmistelussa, Pihlajamäen ala-asteen kouluisäntä Janne Martikainen, joka ystävällisyydellään ja avuliaisuudellaan mahdollisti mittausten toteuttamisen ja Swegon Oy:n henkilöstö, erityisesti Olli Ali-Rantala, joka auttoi ilmastointikoneen teknisiin ominaisuuksiin liittyvissä kysymyksissä.

Professori Kai Siréniä haluan kiittää työn valvomisesta ja asiantuntijuudesta.

Lisäksi haluan kiittää Janettea tasapainon tuomisesta työn ja vapaa-ajan välille.

Espoossa 28.06.2012



Jesse Kantola

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

1	JOHDANTO	11
1.1	Tutkimuksen tausta	11
1.2	Tutkimuksen tavoitteet	11
1.3	Tutkimuksen rajaus	12
1.4	Tutkimusmenetelmät	12
2	SISÄILMASTO JA SEN MERKITYS.....	14
2.1	Sisäilmastoa koskevat määräykset ja ohjeet Suomessa	14
2.1.1	Lämpöolot	14
2.1.2	Ilman laatu	16
2.1.3	Ääniolosuhteet	17
2.1.4	Ilmamäärät	17
2.2	Sisäympäristön vaikutukset terveyteen ja koulutehtävistä suoriutumiseen	18
2.2.1	Sisäilmasto-ongelmat ja oireet	19
2.2.2	Sisäilman laadun vaikutukset koulutehtävistä suoriutumiseen	20
2.2.3	Sisäilman lämpötilan vaikutukset koulutehtävistä suoriutumiseen	21
3	KOULUJEN SISÄILMASTO-ONGELMAT	23
3.1	Ongelmat Suomessa	23
3.1.1	Yleisimmät sisäilmasto-ongelmat kouluissa	23
3.1.2	Ilmanvaihtojärjestelmistä aiheutuvat ongelmat	23
3.1.3	Koulujen sisäilmaston mittaukset	24
3.2	Ongelmat ulkomailla	26

3.3	Tutkimuksen kohteena olevan koulun sisäilmasto-ongelmat	28
3.3.1	Kohteen perustiedot	28
3.3.2	LVI-teknisten laitteiden kunto	29
3.3.3	Ala- ja välipohja.....	30
3.3.4	Ulko- ja väliseinät	30
3.3.5	Ikkunat	30
3.3.6	Ilmanvaihdon riittävyys	31
4	SEKOITTAVAN JA SYRJÄYTTÄVÄN ILMANJAON PERIAATTEET JA ILMANVAIHDON INDEKSIT	31
4.1	Ilmanjakotavan valinta.....	31
4.2	Sekoittava ilmanjako.....	32
4.3	Syrjäyttävä ilmanjako	33
4.3.1	Tuloilmavirran mitoitus ilmanlaatuun perustuen.....	34
4.3.2	Tuloilmavirran mitoitus lämpöviihtyvyyteen perustuen.....	36
4.4	Ilmanvaihdon tehokkuus ja siihen liittyvät indeksit	38
4.4.1	Epäpuhtauksien poistotehokkuus.....	38
4.4.2	Lämpötilahyötysuhde.....	39
4.4.3	Lämpöviihtyvyys	39
4.4.4	Ilman laatu	40
4.4.5	Ilmanjakoindeksi.....	40
4.4.6	Hiilidioksidipitoisuus epäjatkuvuustilassa.....	41
4.5	Ilmanjakotapoihin liittyvä tutkimus.....	42
5	TILAKOHTAINEN ILMASTOINTIKONE	45
5.1	Tilakohtaisen ilmanvaihtokoneen toteutusvaihtoehdot	45
5.2	Ilmastointikone integroidulla tulo- ja poistoilmalla.....	45
5.2.1	Ilmastointikoneen tekniset tiedot	45
5.2.2	Ilmastointikoneen automatiikka ja ohjaus	46

5.3	Ilmastointikoneen asennustapa	48
5.3.1	Tilakohtaisen ilmastointikoneen asennustapa.....	48
5.3.2	Rakentamismääräykset koskien raitis- ja jäteilman seinäpuhallusta	48
6	MITTAUKSET TUTKIMUSKOHTIEN KOULULUOKISSA.....	50
6.1	Mittauskohtien esittely	50
6.2	Mittausten tavoitteet	51
6.3	Mittausmenetelmät.....	51
6.3.1	Mittalaitteet.....	51
6.3.2	Luokan 4 perusmittaukset.....	52
6.3.3	Luokan 4 syventävät mittaukset	53
6.3.4	Luokan 5 mittaukset.....	58
6.4	Mittauksilukut.....	59
6.4.1	Luokka 4: Koneellinen poistoilmanvaihto puolella teholla.....	59
6.4.2	Luokka 4: Koneellinen poistoilmanvaihto täydellä teholla	60
6.4.3	Luokka 4: Tilakohtainen ilmastointikone tarpeenmukaisella ohjauksella.....	64
6.4.4	Luokka 4: Tilakohtainen ilmastointikone vakioilmavirralla	68
6.4.5	Luokka 5: Koneellinen poistoilmanvaihto puolella teholla.....	72
6.4.6	Luokka 5: Koneellinen poistoilmanvaihto täydellä teholla	73
6.4.7	Luokka 5: Tilakohtainen ilmastointikone tarpeenmukaisella ohjauksella.....	75
6.5	Mittauksilukujen tarkastelu.....	76
6.5.1	Luokka 4: Ilmamäärät.....	76
6.5.2	Luokka 4: Lämpötila.....	78
6.5.3	Luokka 4: Lämpötilan kerrostuminen.....	79
6.5.4	Luokka 4: Hiilidioksidipitoisuus	81
6.5.5	Luokka 4: Hiilidioksidin kerrostuminen.....	84
6.5.6	Luokka 4: Paine-ero ulkovaipan yli.....	85
6.5.7	Luokka 4: Ilman nopeudet ja äänitaso	86

6.5.8	Luokka 4: Ilmanvaihdon tehokkuus	89
6.5.9	Luokka 5: Ilmamäärät.....	92
6.5.10	Luokka 5: Lämpötila.....	92
6.5.11	Luokka 5: Hiilidioksidipitoisuus	93
6.5.12	Luokka 5: Paine-ero ulkovaipan yli.....	95
6.6	Johtopäätökset mittauksista	96
7	ILMANVAIHTOJÄRJESTELMIEN KUSTANNUSVERTAILU.....	101
7.1	Vertailun tavoitteet ja menetelmät.....	101
7.2	Elinkaarikustannusten laskeminen.....	101
7.2.1	Investointikustannukset	101
7.2.2	Käyttökustannukset.....	102
7.2.3	Huoltokustannukset	107
7.2.4	Ilmanvaihtojärjestelmän elinkaaren aikaiset kokonaiskustannukset	108
7.3	Kustannuslaskennan tulokset.....	109
7.3.1	Investointikustannukset	109
7.3.2	Käyttökustannukset.....	110
7.3.3	Huoltokustannukset	113
7.3.4	Kokonaiskustannusten nykyarvo	113
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	115

LÄHDELUETTELO

LIITELUETTELO

Käytettyjen merkintöjen selitykset

Symboli	Merkitys	Yksikkö
t	Lämpötila	°C
v	Nopeus	m/s
Tu	Turbulenssiaste	%
L	Äänitaso	dB
Φ	Teho	W
q	Tilavuusvirta	m ³ /s
ρ	Tiheys	kg/m ³
c_p	Ominaislämpökapasiteetti	J/kg°C
θ	Lämpötila	°C
h	Korkeus	m
h	Hinta	€
s	Vertikaalinen lämpötilaero	°C
V	Tilavuus	m ³
ε_c	Epäpuhtauksien poistotehokkuus	-
c	Epäpuhtauspitoisuus	ppm
ε_t	Lämpötilahyötysuhde	-
N_t	Lämpöviihtyvyyssindeksi	-
N_c	Ilmanlaatuindeksi	-
ADI	Ilmanjakoindeksi	-
E	Energiankulutus	kWh
P_{es}	Ominais sähköteho	kW/(m ³ /s)
Δ	Muutos	-
Q	Lämpöenergiankulutus	kWh
η	Hyötysuhde	-
S	Lämmöntarveluku	°Ch
r	Reaalikorko	%
i	Nimelliskorko	%
f	Inflaatio	%
r_e	Eskalaation huomioiva reaalikorko	%
e	Eskalaatio	%

n	Tarkasteluaika	a
a'	Inflaation huomioon ottava jaksollisten suoritusten diskonttaustekijä	-
a''	Inflaation ja eskalaation huomioon ottava diskonttaustekijä kumuloituville suorituksille	-
H	Huoltokustannukset	€
I_0	Investointikustannukset	€

Alaindeksi	Merkitys
i	Ilma
s	Tuloilma
s	Huoneilma
s	Sähkö
k	Kaukolämpö
e	Poistoilma
oz	Oleskelualue
f	Lattia
c	Epäpuhtaus
t	Lämpötila
ka	Keskiarvo
max	Maksimiarvo
min	Minimiarvo
t	Tuloilma
LTO	Lämmöntalteenotto
$jl, patteri$	Jälkilämmityspatteri
iv	Ilmanvaihto
n	Tarkasteluaika
n	Lukumäärä
tot	Kokonais

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Koulut ovat tärkeitä julkisia sisäympäristöjä, joiden tulisi tarjota mahdollisimman terveelliset ja muutoinkin hyvät puitteet oppimisen edistämiseen. Kuitenkin kouluissa sekä Suomessa että ulkomailla on havaittu paljon ongelmia sisäilmastossa. Sisäilmasto-ongelmien on osoitettu vaikuttavan tiloissa työskentelevien ja oleskelevien terveyteen ja suoriutuksiin niitä alentavasti. Usein sisäilmasto-ongelmat kouluissa liittyvät riittämättömään tai toimimattomaan ilmanvaihtoon ja epäpuhtauksiin, joita tilaan saattaa kulkeutua muun muassa rakenteista. Myös ihmisperäiset epäpuhtaudet aiheuttavat oireita ilmanvaihtuvuuden ollessa riittämätön. Koululuokkien ollessa kyseessä riittämättömän ilmanvaihtuvuuden aiheuttamat ongelmat saattavat korostua johtuen koululuokkien ominaispiirteestä, eli vähäisestä lattiapinta-alasta henkilöä kohden.

Joissakin tapauksissa sisäilmasto-ongelmat ovat niin vakavia, että niiden korjaaminen vaatii pikaisia toimenpiteitä. Jos ongelmiin ei puututa, voi huono sisäilmasto aiheuttaa tilaa käyttävillä ihmisillä terveydellisiä oireita. Saneerauspäätöksen syntyminen ja saneerauksen aloittaminen saattaa kuitenkin viedä niin paljon aikaa, että sisäilmasto-ongelmien ratkaisemiseksi on tehtävä väliaikainen ratkaisu laajaa saneerausta odotellessa. Tutkimuksessa selvitetään, onko tilakohtainen ilmastointikone perusteltu vaihtoehto ainakin väliaikaiseksi ratkaisuksi sisäilmasto-ongelmien korjaamiseksi koululuokassa.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, voidaanko tilakohtaisella ilmastointikoneella tuottaa hyväksyttävä sisäilmaston laatu koululuokkaan. Tutkimuksessa käytettävä ilmastointikone toimii syrjäyttävällä ilmanjakotavalla. Yksi tavoitteista on selvittää, miten syrjäyttävä ilmanjako toimii luokkahuoneen ilmanjakoratkaisuna ja toteutuvatko syrjäyttävän ilmanjaon periaatteet käytettäessä tilakohtaista ilmastointikonetta.

Tutkimuksessa selvitetään myös tilakohtaisen ilmastointikoneen elinkaarikustannukset ja verrataan niitä keskitettyyn koneelliseen tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmään sekä koneelliseen poistoilmanvaihtojärjestelmään, joka oli tutkimuskohteen ilmanvaihtojär-

jestelmä ennen tilakohtaisten ilmastointikoneiden käyttöönottoa. Elinkaarikustannukset laskemalla saadaan selville kuinka paljon tilakohtaisilla ilmastointikoneilla toteutettu järjestelmä tulee maksamaan elinkaarensa aikana ja onko kyseisen järjestelmän asentaminen taloudellisesti perusteltua.

1.3 Tutkimuksen rajaus

Tutkimuksessa keskitytään selvittämään tilakohtaisen ilmastointikoneen käyttöä koulu- luokissa. Muita tiloja tutkimuksessa ei käsitellä. Tutkimuksen mittausosio rajataan koululuokkaan ja siihen yhteydessä olevaan ulkoilmaan. Tilakohtaisen ilmastointikoneen vaikutukset rakennuksen muuhun ilmanvaihtojärjestelmään jätetään tässä työssä huomioita. Koska pääosa mittauksista suoritetaan koulupäivien aikana luokkien ollessa käytössä, on mittauspisteiden määrä käytännön syistä rajattu. Tämä tarkoittaa sitä, että tutkimuksessa ei saada tietoa koko luokahuoneen sisäilmasto-olosuhteista kattavasti.

Tutkimuksen mittaukset käsittävät syrjäyttävän ilmanjakoperiaatteen, jolla tilakohtainen ilmastointikone on toteutettu. Lisäksi mitataan koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän luokkaan aikaansaamia sisäilmasto-olosuhteita. Tutkimuksessa myös vertaillaan kirjallisuustutkimuksena sekoittavaa ja syrjäyttävää ilmanjakoa teorian ja aikaisempien tutkimuksien valossa.

Taloudellisen tarkastelun osio rajataan käsittämään vertailun hajautetun tilakohtaisilla ilmastointikoneilla toteutetun ilmastointijärjestelmän ja tavanomaisen keskitetyn ilmastointijärjestelmän välillä. Tavanomaisella ratkaisulla tarkoitetaan tässä keskitettyä sekoittavalla ilmanjaolla toteutettua tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmää, jossa ilmastointikone sijoitetaan vesikatolle tai ullakkotiloihin. Ilmastointikoneelta tuodaan tulo- ja poistoilmakanavat luokkiin. Luokkiin sijoitetaan sekoittavan ilmanjaon tulo- ja poistoilmapäätelaitteet sekä luokkakohtaiset ilmamääräsäätimet. Kahta edellä mainittua ilmastointijärjestelmää verrataan keskenään sekä olevaan ratkaisuun eli koneelliseen poistoilmanvaihtojärjestelmään.

1.4 Tutkimusmenetelmät

Tutkimus koostuu kirjallisuustutkimusosiosta, kenttämittauksista sekä kustannus- ja energiankulutusvertailusta. Kirjallisuustutkimuksessa esitellään sisäilmastoa koskevia

viranomaismääräyksiä ja ohjeita, sekä sisäilmaston merkitystä ihmisen terveydelle ja koulutehtävistä suoriutumiseen aikaisempien tutkimusten valossa. Kirjallisuustutkimuksessa esitellään myös koulujen sisäilmasto-ongelmia sekä Suomessa että ulkomailla tehtyjen tutkimuksien valossa ja ilmanjakotapoihin liittyvää aiempaa tutkimusta.

Mittausosio koostuu kenttämittauksista kahdessa ala-asteen koululuokassa, joihin on asennettu tilakohtainen ilmastointikone. Tilakohtaisen ilmastointikoneen toimivuutta tutkitaan sijoittamalla sen palvelemaan luokkaan mittareita, joilla luokkahuoneen sisäilmaston eri suureita seurataan aina viikon pituisen seurantajakson aikana. Sisäilmaston olosuhteita seurataan sekä tilakohtaisen ilmastointikoneen ollessa toiminnassa että koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän ollessa toiminnassa. Näin saadaan tietoa tilanteesta, joka vallitsi ennen tilakohtaisen ilmastointikoneen asentamista, sekä tilanteesta ilmastointikoneen asentamisen jälkeen.

Kustannus- ja energiankulutusvertailu tehdään kolmen ilmanvaihtojärjestelmän välillä: koneellinen poistojärjestelmä, keskitetty koneellinen tulo- ja poistojärjestelmä sekä hajautettu tulo- ja poistojärjestelmä, joka on toteutettu tilakohtaisilla ilmastointikoneilla. Kustannus- ja energiankulutusvertailussa lasketaan kunkin järjestelmän vuotuinen energiankulutus, vuotuiset käyttö- ja huoltokustannukset ja investointikustannus, joita vertaillaan keskenään. Lisäksi lasketaan eri ilmanvaihtojärjestelmien elinkaarikustannukset nykyarvomenetelmällä käyttäen 15, 20 ja 25 vuoden tarkasteluaikoja.

2 SISÄILMASTO JA SEN MERKITYS

2.1 Sisäilmastoa koskevat määräykset ja ohjeet Suomessa

Monissa maissa on omia kansallisia määräyksiä ja suosituksia koskien sisäilmastoa. Suomessa Ympäristöministeriö ylläpitää Suomen rakentamismääräyskokoelmaa, jonka osassa D2 on annettu määräyksiä ja ohjeita rakennuksen sisäilmastolle ja ilmanvaihdon [1]. Tämän lisäksi sisäilmaston terveellisuuden ja viihtyisyyden edistämiseksi ja suunnittelun ohjaamiseksi on kirjoitettu Sisäilmastoluokitus 2008. Sisäilmastoluokituksessa annetaan tavoite- ja suunnitteluarvot sisäilmastolle sekä vaatimukset rakennustuotteille. Sisäilmastoluokitus on tarkoitettu käytettäväksi suunnittelun ja urakoinnin sekä rakennustarviketeollisuuden apuna silloin, kun tavoitteena on rakentaa entistä terveellisempiä ja viihtyisämpiä rakennuksia. Uudisrakentamisen lisäksi luokitusta voidaan käyttää soveltuvin osin myös korjausrakentamisessa. [2]

Sisäilmastoluokitus 2008:ssa luokitellaan sisäilmasto kolmeen luokkaan S1-S3. Luokka S1 tarkoittaa yksilöllistä sisäilmastoa ja vastaa siten parasta luokitusta, S2 tarkoittaa hyvää sisäilmastoa ja S3 tyydyttävää sisäilmastoa, joka täyttää rakentamismääräysten vähimmäisvaatimukset. [2]

Rakentamismääräyskokoelman osassa D2 määritellään seuraavasti oleskeluvyöhyke, jossa sisäilmastovaatimukset on suunniteltu toteutuvaksi: *"Yleensä se on vähintään huonetilan osa, jonka alapinta rajoittuu lattiaan, yläpinta on 1,8 m:n korkeudella lattiasta ja sivupinnat 0,6 m:n etäisyydellä seinistä tai vastaavista kiinteistä rakennusosista"* [1].

2.1.1 Lämpöolot

Rakentamismääräyskokoelman ohjeissa sanotaan, että oleskeluvyöhykkeen huonelämpötilan suunnitteluarvona lämmityskaudella käytetään yleensä lämpötilaa 21 °C ja kesäkautena 23 °C. Lisäksi mainitaan, että hyväksyttävä poikkeama oleskeluvyöhykkeen huonelämpötilan suunnitteluarvosta huonetilan keskellä 1,1 metrin korkeudella lämmityskaudella on +/- 1 °C.

Rakennuksen käyttöaikana ei huonelämpötila yleensä saa olla korkeampi kuin 25 °C. Ulkoilman lämpötilan viiden tunnin enimmäisjakson keskiarvon ollessa korkeampi kuin 20 °C voi huoneilman lämpötila ylittää tämän arvon korkeintaan 5 °C. Jos tilassa on rakenteita tai laitteita, jotka aiheuttavat voimakasta lämpösäteilyä tai korkeita tai matalia pintalämpötiloja, on huonelämpötila tarkistettava laskelmin operatiivisen lämpötilan avulla. [1]

Sisäilmastoluokitus 2008 määrittelee lämpötiloille tavoitearvot rakentamismääräyskoelmaa yksityiskohtaisemmin. Nämä operatiivisen lämpötilan tavoitearvot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Lämpötilan tavoitearvot, Sisäilmastoluokitus 2008. [2]

	S1	S2	S3
Operatiivinen lämpötila t_{op} [°C]			
$t_u \leq 10$ °C	21,5 ¹⁾	21,5	21
$10 < t_u \leq 20$ °C	$21,5 + 0,3 \times (t_u - 10)$ ¹⁾	$21,5 + 0,3 \times (t_u - 10)$	$21 + 0,4 \times (t_u - 10)$
$t_u > 20$ °C	24,5 ¹⁾	24,5	25
Sallittu poikkeama tavoitearvosta [°C]	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$
Operatiivisen lämpötilan enimmäisarvo [°C]	$t_{op} + 1,5$	$t_u \leq 10$ °C: $t_{op} + 1,5$ $10 < t_u \leq 20$ °C: $21,5 + 0,4 \times (t_u - 10)$ $t_u > 20$ °C: 27	$t_u \leq 15$ °C: 25 $t_u > 15$ °C: $t_{umax} + 5$
Operatiivisen lämpötilan vähimmäisarvo [°C]	20	20	18
Olosuhteiden pysyvyys [% käyttöajasta]			
- toimi- ja opetustilat	95 %	90 %	--
- asunnot	90 %	80 %	--

1) S1-luokassa operatiivisen lämpötilan on oltava tila/huoneistokohtaisesti aseteltavissa välillä $t_{op} \pm 1,5$ °C. Jos samassa huoneessa on useita henkilöitä, käytetään lämpötilan tavoitetasona taulukossa esitettyjä tavoitearvoja.

t_u on ulkoilman 24 tunnin liukuva keskiarvo lähimmällä säähavaintopaikalla

t_{umax} on ulkoilman lämpötilan viiden tunnin enimmäisjakson keskiarvo.

Ilman lämpötilan tavoitearvojen lisäksi on sekä rakentamismääräyskokoelmassa että Sisäilmastoluokitus 2008:ssa määritelty ilman liikenopeudelle tavoitearvot. Ilman nopeuden tavoitearvot riippuvat ilman lämpötilasta. Normaalissa toimistotyössä viihtyvyys-

lämpötila on 21-24 °C. Keho sietää huomattavasti korkeampia ilman nopeuksia viihtyvyysalueen ylärajoilla tai sen yläpuolella kuin alarajoilla [3]. Taulukossa 2 on esitetty Sisäilmastoluokitus 2008:ssa ja rakentamismääräyskokoelma D2:ssa annetut suositukset ilman nopeuksille.

Ilman liikkeen aiheuttama vetoriski voidaan laskea seuraavasti [4]:

$$DR = (34 - t_a)(v - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37v \cdot Tu + 3,14) \tag{1}$$

missä

t_a on paikallinen ilman lämpötila [°C]

v on paikallinen ilman keskinopeus [m/s]

Tu on paikallinen turbulenssiaste [%].

Taulukko 2. Ilman liikenopeuden tavoitearvot [1, 2]

	S1	S2	S3, RakMK D2
Ilman liikenopeus [m/s]			
$t_{ilma} = 21\text{ °C}$	< 0,14	< 0,17	0,2 (talvi)
$t_{ilma} = 23\text{ °C}$	< 0,16	< 0,20	
$t_{ilma} = 25\text{ °C}$	< 0,20	< 0,25	0,3 (kesä)

Liian suuri ilman pystysuuntainen lämpötilaero aiheuttaa paikallista epäviihtyvyyttä, mistä syystä ilman lämpötilojen erolle nilkkojen ja pään korkeudella on annettu suositusarvoja [3]. Sisäilmastoluokitus 2008 antaa suunnitteluarvoksi pystysuuntaiselle lämpötilaerolle sisäilmastoluokissa S1, S2 ja S3 2, 3 ja 4 °C/m vastaavasti. Lämpötilaerolla tarkoitetaan tässä tapauksessa lämpötilaeroa nilkkojen ja niskan välillä, mittauskorkeudet ovat 0,1 m ja 1,1 m (istumatyö). [2]

2.1.2 Ilman laatu

Rakentamismääräyskokoelman osan D2 mukaan rakennus on suunniteltava siten, ettei sisäilmassa esiinny haitallisessa määrin kaasuja, hiukkasia tai mikrobeja eikä viihtyvyyttä alentavia hajuja. Ohjeessa on mainittu, että tavanomaisissa sääoloissa huonetilan käyttöaikana hiilidioksidipitoisuuden enimmäisarvo on yleensä 1200 ppm. [1] Taulu-

manvaihto on oltava ohjattavissa tarpeen mukaan. [1] Taulukossa 4 on esitetty Sisäilmastoluokituksen mukaiset ulkoilmavirtojen normaalin käyttötilanteen mitoitusarvot opetustilassa, joka täyttää erittäin vähäpäästöisen rakennuksen kriteerit.

Taulukko 4. Ulkoilmavirtojen mitoitusarvot opetustiloissa Sisäilmastoluokitus 2008:n mukaisesti [2]

Tila	S1		S2		S3	
	(dm ³ /s)/hlö	(dm ³ /s)/m ²	(dm ³ /s)/hlö	(dm ³ /s)/m ²	(dm ³ /s)/hlö	(dm ³ /s)/m ²
Luokkahuone	11	5,5	8	4,0	6	3,0
Luentosali	11	10,5	8	7,5	6	6,0
Käytävä, aula koulussa	11	5,5	8	4,0	-	4,0

2.2 Sisäympäristön vaikutukset terveyteen ja koulutehtävistä suoriutumiseen

Ihmiset viettävät suurimman osan ajastaan sisätiloissa, joten sisäilmaston laadulla on suuri merkitys ihmisten viihtyvyyteen ja terveyteen. Sisäilmaston vaikutuksia ihmisten terveyteen on tutkittu niin julkisissa kuin toimistorakennuksissakin. Sisäilmastossa ilmenevät epäpuhtaudet, liian alhaiset tai korkeat lämpötilat ja riittämätön ilmanvaihto voivat aiheuttaa ihmisille epämukavuutta, erilaisia terveydellisiä oireita ja lisätä poissaolojen määrää.

Riittävän ilmanvaihdon avulla voidaan tilasta poistaa epäpuhtauksia tehokkaasti, jolloin sisäilmaston epäpuhtauksista johtuvat terveysvaikutukset pienenevät. Monissa tutkimuksien kohteena olleissa rakennuksissa on mitattu liian pieniä tuloilmavirtoja. Tuloilmavirtojen kasvattaminen toimistorakennuksissa ja muissa vastaavissa kohteissa, joissa tuloilmavirrat ovat 0-10 dm³/s henkilöä kohden, vähentää merkittävästi sisäilmasta johtuvia oireita ja parantaa ihmisten kokemaa sisäilman laatua. [5]

Sisäilmasto-ongelmien vaikutuksista työskentelytehokkuuteen kouluissa on julkaistu vähemmän tutkimuksia kuin esimerkiksi toimistoissa [6]. Toimistoympäristössä tehty-

jen tutkimusten tulokset ovat kuitenkin verrattavissa kouluympäristöön. Monen julkais-
tun tutkimuksen mukaan kouluissa on usein liian pieni ilmanvaihtuvuus oppilaiden lu-
kumäärään nähden. Tämä aiheuttaa muun muassa ihmisperäisten epäpuhtauksien, mik-
robien, VOC:ien (engl. volatile organic compounds) ja hiukkasten pitoisuuksien kasvua
tiloissa ja alentaa oppilaiden terveydentilaa, sisäilmaston laatua sekä lisää poissaolojen
määrää. [7, 8]

2.2.1 Sisäilmasto-ongelmat ja oireet

Sisäilmaston laatuun vaikuttavat kemiallisten ja fysikaalisten tekijöiden muodostama
kokonaisuus. Tärkeimmät tekijät sisäilmastossa ovat lämpöolosuhteet sekä ilman laatu.
Lämpöolosuhteisiin vaikuttavat ilman lämpötila, säteily pinnoista ja veto eli ihon pai-
kallinen epämiellyttävänä koettava jäähtyminen. Ilman laatuun puolestaan vaikuttavat
erilaiset kemialliset ja biologiset epäpuhtaudet, kosteus ja pölyt. [9]

Epäpuhtauksien lähteitä ovat tilassa olevien ihmisten lisäksi mahdollisista kosteusvauri-
oista johtuva mikrobikasvu, materiaalipäästöt, mineraalikuidut, ilmanvaihtojärjestelmän
likaisuus ja hajuhaitat. Sisäilmasto-ongelmien syyn selvittäminen on usein vaikeaa, sillä
ongelmat saattavat johtua monesta eri epäpuhtauslähteestä tai niiden yhdistelmästä. [10]

Sisäilmasto-ongelmat havaitaan yleensä siten, että rakennuksen käyttäjät alkavat oirei-
lemaan ja tuomaan vaivojaan esille. Oireisiin on syytä suhtautua heti vakavasti ja ne
ovat selkeä syy tutkia rakennuksen kuntoa mukaan lukien sisäilmasto. Tyypillisiä kos-
teusvaurioihin yhdistettäviä oireita ovat hengitystie- tai silmäoireet, lisääntyneet hengi-
tystieinfektiot, lisääntynyt allergia ja astma sekä muut yleisoireet, kuten päänsärky, vä-
symys ja pahoinvointi.

Vaikka rakennuksen peruseräparannus tai -korjaus tehtäisiin muusta syystä kuin sisäilmas-
ton parantamisen vuoksi, olisi tärkeää tutkia rakennuksen kunto kokonaisuudessaan.
Tällöin voidaan paremmin varmistaa, että korjaustoimenpiteet kohdistuvat oikeisiin asi-
oihin. Monissa tapauksissa ongelmat on havaittu vasta peruskorjauksen jälkeen. Tämä
on puolestaan johtanut uusintakorjauksiin ja jopa rakennuksen purkamiseen. [10]

2.2.2 Sisäilman laadun vaikutukset koulutehtävistä suoriutumiseen

Ilman laadun vaikutuksia oppilaiden koulutehtävistä suoriutumiseen on tutkittu muun muassa Yhdysvalloissa, Japanissa ja Isossa-Britanniassa [7, 9, 11]. Tutkimuksissa on usein etsitty riippuvuutta ilmanvaihdon määrän ja koulutehtävistä suoriutumisen välille. Ilmanvaihdon määrän voidaan katsoa vaikuttavan sisäilman laatuun, sillä se vaikuttaa sisäilmassa esiintyvien epäpuhtauksien pitoisuuteen.

Alhaiset ilmamäärät johtavat tunkkaisena koettuun ilmaan ja lisäävät epäpuhtauksien kuten mikrobien, hiukkasten ja VOC:ien pitoisuutta ilmassa, mikä puolestaan lisää negatiivisia terveysvaikutuksia ja poissaolojen määrää. Nämä tekijät saattavat vaikuttaa alentavasti oppimiskykyyn ja koulutehtävistä suoriutumiseen. [7]

Haverinen-Shaughnessy ym. löysivät lineaarisen riippuvuuden ilmamäärien ja matematiikan sekä lukemisen koetulosten välille. Tutkimus käsitti 100 yhdysvaltalaisesta koulusta ja tutkimukseen valittiin jokaisesta koulusta yksi luokka, jonka oppilaat olivat viidesluokkalaisten. Kokeet, joiden tuloksia analysoitiin, olivat normaalit vuosittain suoritettavat tasokokeet, jotka olivat samat kaikille kouluille. Tutkimuksen mukaan jokaisella yksiköllä ($1 \text{ dm}^3/\text{s}$), jolla ilmamäärää oppilasta kohden nostetaan, kasvaa matematiikan standardoidun kokeen läpäisseiden osuus 2,9 % ja lukemisen standardoidun kokeen läpäisseiden osuus 2,7 %. Tulos pätee ilmamäärille 0,9-7,1 dm^3/s . [7]

Riippuvuus koetulosten ja ilmamäärien välillä oli merkitsevä sekä matematiikan ($P = 0,010$) että lukemisen ($P = 0,012$) kokeessa. Tutkimuksessa oli mukana 100 koulusta mutta lineaarinen riippuvuus ilmamäärän ja koetulosten välille havaittiin ainoastaan sille 87 koulun osajoukolle, jonka ilmamäärät olivat alle 7,1 dm^3/s oppilasta kohden. Kouluissa, joissa ilmamäärät olivat yli 7,1 dm^3/s oppilasta kohden, ei havaittu lineaarista riippuvuutta. Tämä johtuu mahdollisesti siitä, että kouluja joiden ilmamäärä oppilasta kohden oli yli 7,1 dm^3/s oli niin vähän. [7]

Iso-Britanniassa tehdyn tutkimuksen tulosten mukaan alhaiset ilmamäärät luokissa huonontavat merkittävästi oppilaiden huomiokykyä ja valppautta. Tutkimus käsitti 8 koulusta ja yhteensä 332 oppilasta iältään 9-10 vuotta. Oppilaat suorittivat tietokoneella 9 erilaisesta testistä, joissa heidän tuli muun muassa reagoida mahdollisimman nopeasti ruudulla tapahtuviin asioihin ohjeiden mukaisesti tai tunnistaa sanoja. Testi kesti 20 minuuttia.

Testit suoritettiin kahdenlaisissa olosuhteissa: käyttämällä ilmanvaihtoon kierrätysilmaa, sekä ulkoilmaa. [9]

Kierrätysilmaa käyttämällä luokkaan luotiin olosuhteet, jotka vastasivat alhaisemman tuloilmamäärän aikaansaamia olosuhteita, kun taas ulkoilmaa käyttämällä luotiin kasvanutta ilmamäärää vastaavat olosuhteet. Näiden eri olosuhteiden testituloksia verrattiin keskenään. Kierrätysilmalla tuloilman määrä henkilöä kohden vastasi $0,6\text{--}4\text{ dm}^3/\text{s}$ ja ulkoilmalla $5,1\text{--}9,6\text{ dm}^3/\text{s}$.

Ilmamäärien kasvattaminen nopeutti oppilaiden reaktioaikaa tehtäviin vastatessa ja paransi vastausten tarkkuutta. Huono ilmanvaihto vaikutti negatiivisesti etenkin vaativammista tehtävistä suoriutumiseen. Vaativampia tehtäviä olivat muun muassa sellaiset, joissa vaadittiin geometrista työmuistia tai sanojen tunnistamista. Tutkimuksen mukaan huonon ilmanvaihdon luokissa oppilaiden tarkkaavaisuus alenee eivätkä he pysty keskittymään opettajan antamiin ohjeisiin. [9]

Japanilaisessa tutkimuksessa tutkittiin ilman laadun vaikutuksia yliopisto-opiskelijoiden koetuloksiin. Koehenkilöt suorittivat teoreettisia aiheita koskevan kokeen, sekä kaksi ulkoa oppimista testaavaa koetta. Kaikki kolme koetta koostuivat 20 monivalintakysymyksestä. Tutkimuksessa testattiin koehenkilöiden suoriutumista pienellä ja suurella tuloilmamäärällä. Pieni ilmamäärä vastasi $0,5\text{--}0,72\text{ dm}^3/\text{s}$ ja suuri $4,4\text{--}5,2\text{ dm}^3/\text{s}$ henkilöä kohden. [11]

Tutkimuksen mukaan ilmamäärän kasvattaminen paransi teoreettisen osion pistemäärää $5,4\%$ ($p < 0,03$) verrattuna alhaisen ilmamäärän tuloksiin. Ulkoa oppimista testaavissa kokeissa ilmamäärän kasvattaminen paransi pistemäärää ensimmäisessä kokeessa $8,7\%$ ($p < 0,002$) ja toisessa kokeessa $5,8\%$ ($p < 0,0007$) verrattuna alhaisen ilmamäärän koetuloksiin. [11]

2.2.3 Sisäilman lämpötilan vaikutukset koulutehtävistä suoriutumiseen

Myös sisäilman lämpötilan vaikutuksia koulutehtävistä suoriutumiseen on tutkittu, vaikka useammat tutkimukset käsittelevätkin lämpötilan vaikutuksia toimistotyöhön [8]. Mendell ja Heath kävivät läpi lukuisia aikaisempia tutkimuksia koskien muun muassa sisäilman laadun ja lämpötilan vaikutuksia koulu- ja toimistotehtävistä suoriutumiseen ja poissaoloihin. Mendellin ja Heathin mukaan aikaisemmat tutkimukset antavat viittei-

tä siitä, että sisäilman korkea lämpötila huonontaa tehtävistä suoriutumista. Mendellin ja Heathin mukaan on kuitenkin tutkimuksia, joiden tuloksista ei voida tehdä pitäviä johtopäätöksiä lämpötilan vaikutuksesta tehtävistä suoriutumiseen. [8]

Tanskassa tehdyssä tutkimuksessa tutkittiin 10-12 -vuotiaiden oppilaiden suoriutumista numeerisista ja kielellisistä tehtävistä. Tutkimuksessa tehtiin viisi koetta, joista kolmessa kasvatettiin tuloilmamäärää 3:sta 10:een dm^3/s henkilöä kohden ja kahdessa laskettiin ilman lämpötila 25:stä 20:een $^{\circ}\text{C}$:een. Tutkimuksen tulosten mukaan tuloilmamäärän kaksinkertaistaminen parantaa koulutehtävistä suoriutumista noin 14,5 % ja luokkahuoneen lämpötilan laskeminen 1 $^{\circ}\text{C}$:lla parantaa suoriutumista noin 3,5 %. [12]

3 KOULUJEN SISÄILMASTO-ONGELMAT

3.1 Ongelmat Suomessa

3.1.1 Yleisimmät sisäilmasto-ongelmat kouluissa

Suomessa oli vuonna 2010 noin 8900 koulurakennusta, joista peruskouluja ja lukioita oli 5380 ja ammatillisia oppilaitoksia 1526. Peruskouluissa opiskeli yhteensä 524 200 oppilasta. Lukioissa ja ammatillisissa oppilaitoksissa opiskeli puolestaan 302 900 oppilasta. [13] Koulujen sisäilmastossa on havaittu paljon ongelmia. Yleisimpiä ongelmia Suomessa tutkimuksen kohteena olleissa koulussa ovat olleet luokkahuoneiden vetoisuus talvisin, riittämätön ilmanvaihto, tunkkainen ilma ja näkyvä home tai homeen haju. Sisäilmasto-ongelmien laajuudesta koko koulurakennuskannassa ei ole tarkkaa tietoa, mutta tutkimuksien valossa ongelmat ovat yleisiä. [14]

Pääkaupunkiseudun 32 koulua koskevan tutkimuksen mukaan suurimpina ongelmina kouluissa ovat usein olleet vanhentuneet tai jopa puuttuvat ilmanvaihtolaitteet. Huolimatta oppilaiden ja opettajien valituksista koskien vetoa ja huonoa sisäilmaa, ei huono sisäilmasto yleensä ole ollut riittävä syy korjaustoimenpiteiden käynnistämiseksi. Pääsääntöisesti LVI-tekniset järjestelmät on uusittu tilamuutosten tai vakavien kosteusvaurioiden aiheuttamien korjaustöiden yhteydessä. Joissakin tapauksissa erikoistilat, kuten tekniset tilat on korjattu hyvään kuntoon, mutta luokkahuoneisiin on jätetty vanha ilmanvaihtojärjestelmä, vaikka se on aiheuttanut valituksia huonon sisäilmaston vuoksi. Myös ilmanvaihtojärjestelmien suunnittelussa ja säädössä on ollut puutteita. [15]

3.1.2 Ilmanvaihtojärjestelmistä aiheutuvat ongelmat

Etenkin vanhoissa koulurakennuksissa ilmanvaihto on usein toteutettu koneellisella poistoilmanvaihtojärjestelmällä. Myös painovoimaisia ilmanvaihtojärjestelmiä esiintyy vanhoissa kouluissa, tosin vähenevissä määrin. Painovoimainen ilmanvaihto aiheuttaa herkästi vetoa talvella, kun kylmä ulkoilma kulkeutuu korvausilmalaitteiden kautta luokkatilaan. Lisäksi ilmamäärät ovat painovoimaisen ilmanvaihdon kyseessä ollessa usein riittämättömiä.

Koneellinen poistojärjestelmä oli yleinen 1950-60 -luvuilla, mutta vieläkin on paljon koulurakennuksia, joissa on koneellinen poistojärjestelmä. Myös koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä on talvisin vedon vaara, kun lämmittämätön korvausilma tuodaan korvausilmalaitteiden kautta ulkoa suoraan luokkatilaan. Lisäksi koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä saattaa aiheuttaa tilaan niin suuren alipaineen, että jos korvausilmalaitteet ovat riittämättömät tai jostain syystä suljetut, voi rakenteista tai muista tiloista kulkeutua hallitsemattomasti epäpuhtauksia sisältävää ilmaa luokkatilaan. Lisäksi koneellisella poistojärjestelmällä varustetuissa kouluissa luokkahuoneiden ilmamäärät ovat usein riittämättömiä.

Koneellista tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmää on koulurakennuksissa nykyään paljon. Sen käyttö yleistyi 1970-luvulla ja nykyään kaikki uudet koulurakennukset varustetaan koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmällä. Koneellinen tulopoistoilmanvaihtojärjestelmä on painovoimaista ja koneellista poistoilmanvaihtojärjestelmää parempi sisäilmasto-ongelmien, kuten vedon, riittämättömän ilmanvaihdon, lämpötilaolosuhteiden, tunkkaisen ilman sekä epämiellyttävän hajun kannalta. Kuitenkin myös koneellisella tulo-poistojärjestelmällä varustetuissa kouluissa on todettu ongelmia sisäilmastossa. [14]

Huonosti suunnitellut koneelliset tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmät saattavat aiheuttaa muun muassa vetoa. Myös säädön ja huollon puutteellisuus saattaa aiheuttaa osan koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmässä havaituista sisäilmasto-ongelmista. [14] Vanhoissa tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmissä saatetaan myös käyttää palautusilmaa 40-60 %, tai ne on suunniteltu ajankohtana, jolloin rakentamismääräysten ilmamäärävaatimukset olivat nykyisiä vaatimuksia pienempiä. Tällöin raaitisilmamäärät jäävät huomattavasti alle uusimpien ohjearvojen. [15]

3.1.3 Koulujen sisäilmaston mittaukset

Kurnitskin ym. tutkimuksessa suoritettiin kertaluontoisia mittauksia 10 koulussa pääkaupunkiseudulla, kaikkiaan 34 luokkahuoneessa. Mittauksissa selvitettiin lämpötila, hiilidioksidipitoisuus, suhteellinen kosteus ja poistoilmavirta. Keskimääräiset tulokset mittauksista on esitetty taulukossa 5. Ilmastointijärjestelmien välillä oli suuria eroja etenkin poistoilmamäärien ja hiilidioksidipitoisuuksien välillä. [15]

**Taulukko 5. Mittaustulosten keskiarvojen minimi-, maksimi- ja keskiarvot
pääkaupunkiseudun 34 luokkahuoneen sisäilmastomittauksista [15]**

	Hiilidioksidipitoisuus [ppm]	Lämpötila [°C]	Suhteellinen kosteus [%]	Poistoilmavirta	
				[l/s-hlö]	[l/s, m²]
Keskiarvo	1204	21,9	37	4,2	1,9
Minimi	600	19,8	28		
Maksimi	3600	24,0	45		

Koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmässä poistoilmamäärät olivat keskimäärin 5,8 dm³/s henkilöä kohden, kun koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä keskiarvo oli 3,2 dm³/s per henkilö ja painovoimaisessa ilmanvaihtojärjestelmässä ainoastaan 0,3 dm³/s per henkilö. Ilmanvaihdon osalta kaiken kaikkiaan vain noin 12 % luokkahuoneista täytti Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjearvon 6 dm³/s henkilöä kohden.

Hiilidioksidipitoisuus oli keskimäärin 1015 ppm koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmässä, 1092 ppm koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä ja 2707 ppm painovoimaisessa ilmanvaihtojärjestelmässä. Huonelämpötilat pysyttelivät noin 20-23 °C:ssa painovoimaisen ja koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän luokissa. Koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän luokissa huonelämpötilat kohosivat joissain tapauksissa lähelle 24 °C:ta johtuen liian korkeasta tuloilman sisäänpuhalluslämpötilasta.

Myös Kurnitskin ym. toisessa tutkimuksessa suoritettiin sisäilmastomittauksia. Mittauksia suoritettiin 10 koulussa yhteensä 56 luokassa. Kouluista kahdeksan oli pääkaupunkiseudulta. Kouluista kaksi oli 50-luvulla rakennettuja painovoimaisen ilmanvaihdon kouluja, kolme 60-luvulla rakennettuja koneellisen poistoilmanvaihdon kouluja ja viisi koulua 70–90 –luvuilla rakennettuja koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon kouluja. Jokaisessa luokassa, jossa mittauksia suoritettiin, seurattiin mitattavia arvoja yhden oppitunnin ajan. Mittaustulokset lämpötilan, hiilidioksidipitoisuuden ja poistoilmavirran osalta on esitetty taulukossa 6. [14]

Taulukko 6. Mittaustulokset 56 luokkahuoneen sisäilmastomittauksista [14]

	Hiilidioksidipitoisuus [ppm]	Lämpötila [°C]	Suhteellinen kosteus [%]	Poistoilmavirta	
				[l/s-hlö]	[l/s, m²]
Keskiarvo	1061	21,4	21,9	3,5	1,2
Minimi	607	17,2	10,8		
Maksimi	2113	25,4	30,6		
Painovoimainen (keskiarvo)	1285	20,6	24,6	1,6	0,39
Koneellinen poisto (keskiarvo)	1181	22,1	21,7	2,3	0,9
Koneellinen tulo-poisto (keskiarvo)	935	21,1	21,5	5,5	1,9

Myös edellä esitellyn tutkimuksen tulokset tukevat koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän parempaa soveltuvuutta luokkahuoneisiin verrattuna painovoimaiseen tai koneelliseen poistoilmanvaihtojärjestelmään. Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä aiheuttaa vähemmän vetoa kuin edellä mainitut kaksi muuta ilmanvaihtojärjestelmää. Lisäksi sillä voidaan aikaansaada parempi sisäilman laatu. [14]

3.2 Ongelmat ulkomailla

Koulujen sisäilmasto-ongelmia on havaittu Suomen lisäksi paljon myös ulkomailla. Tutkimuksia, joissa koulujen sisäilmaston laatua on mitattu ja arvioitu, on paljon. Muun muassa Ruotsissa, Norjassa ja Tanskassa on 1980- ja 1990-luvuilla tutkittu sikäläisten koulujen sisäilmastoa ja tutkimukset ovat osoittaneet puutteita sisäilman laadussa [14]. Myös Yhdysvalloissa koulujen sisäilman laatua ja sen vaikutuksia ihmisiin on tutkittu [16, 17].

Monesti ongelmat sisäilman laadussa johtuvat riittämättömästä ilmanvaihdosta [16, 17]. Hiilidioksidipitoisuus, joka toimii indikaattorina myös muiden ihmisperäisten hajujen ja epäpuhtauksien esiintymiselle, nousee usein riittämättömän ilmanvaihdon vuoksi korkeaksi. Riittävän ilmanvaihdon takaaminen vähentää sisäilmasta johtuvia terveysoireita [5].

Daiseyn ym. Yhdysvalloissa tehdyssä koulujen sisäilmaston laatua, ilmastointia ja terveysoireita käsittelevässä kirjallisuustutkimuksessa tarkasteltiin aikaisempia tutkimuksia, joita aiheesta oli tehty [17]. Mukana oli tutkimuksia yhdysvaltalaisista, kanadalaisista, tanskalaisista, ruotsalaisista ja hollantilaisista kouluista. Yhteensä tutkimuksessa tarkasteltiin yli 300 vertaisarvioitua artikkelia.

Hiilidioksidipitoisuudet koululuokissa olivat Daiseyn ym. kirjallisuustutkimuksen mukaan keskimäärin yli 1000 ppm:n, joka on ASHRAE-standardin raja-arvo [17]. Pitoisuudet vaihtelivat kuitenkin paljon ja esimerkiksi hollantilaisessa tutkimuksessa hiilidioksidipitoisuudet ylittivät paikallisen standardin 1200 ppm:n 27-97 % kouluajasta. Hiilidioksidimittaukset oli tutkimuksissa usein tehty kuitenkin lyhyellä aikavälillä tai kertamittauksina, jolloin ei välttämättä saada riittävää pitkän aikavälin tietoa ilmastoinnin toiminnasta. Hiilidioksidipitoisuudet vaihtelevat voimakkaasti koulupäivien aikana riippuen ilmanvaihdon tehokkuudesta ja oppilaiden määrästä luokassa.

Vaikka Daiseyn ym. kirjallisuustutkimuksessa ei voitukaan tehdä pitäviä johtopäätöksiä ilmanvaihdon ja terveysoireiden keskinäiselle riippuvuudelle kouluissa, on Seppänen tehnyt 20 tutkimusta ja lähes 30 000 kohdetta käsittävän kirjallisuuskatsauksen ilmanvaihdon ja terveysoireiden riippuvuudesta [5]. Seppäsen kirjallisuuskatsauksen tutkimuksissa kohteena olivat aikuiset ihmiset työympäristössä. Olettaen, että epäpuhtauksille altistuminen kouluissa riippuu ilmamäärästä samalla tavalla kuin toimistoissa, ja että lapset ovat vähintään yhtä herkkiä altisteille kuin aikuiset, voidaan Seppäsen kirjallisuuskatsauksen tuloksien katsoa soveltuvan myös kouluihin [17].

Seppäsen tutkimuksen mukaan ilmamäärien kasvattaminen silloin, kun ilmamäärät ovat alle 10 dm³/s henkilöä kohden, vähentää keskimäärin merkittävästi sisäilmasta johtuvia oireita ja parantaa ihmisten kokemaa sisäilman laatua [5]. Daiseyn ym. tutkimuksen havainnot koulujen riittämättömästä ilmanvaihdosta yhdistettynä Seppäsen tutkimuksen tuloksiin viittaavat vahvasti siihen, että puutteellinen sisäilmasto vaikuttaa koululaisten terveyteen [5, 17]. Ilman laatua parannettaessa riittävän ilmanvaihdon takaaminen on ensimmäisiä toimenpiteitä.

Yhdysvalloissa Minnesotassa tehdyssä tutkimuksessa mitattiin ilman laatua seuranta-mittauksena 85 luokassa kouluvuoden 2003-2004 ajan. Tutkimuksessa havaittiin koululuokissa korkeaksi kohonneita hiilidioksidipitoisuuksia. Kolme mukana olleista kahdek-

sasta koulusta oli noudattanut Minnesota Department of Educationin suositusta vähimmäisilmamäärästä 7,5 dm³/s henkilöä kohden. Näissä kouluissa ylitettiin harvoin 1000 ppm hiilidioksidipitoisuutta missään mittauksissa mukana olleista luokista. Muissa kouluissa korkeat hiilidioksidipitoisuudet johtuivat useimmiten puutteista ilmanvaihtolaitteiston toiminnassa. [16]

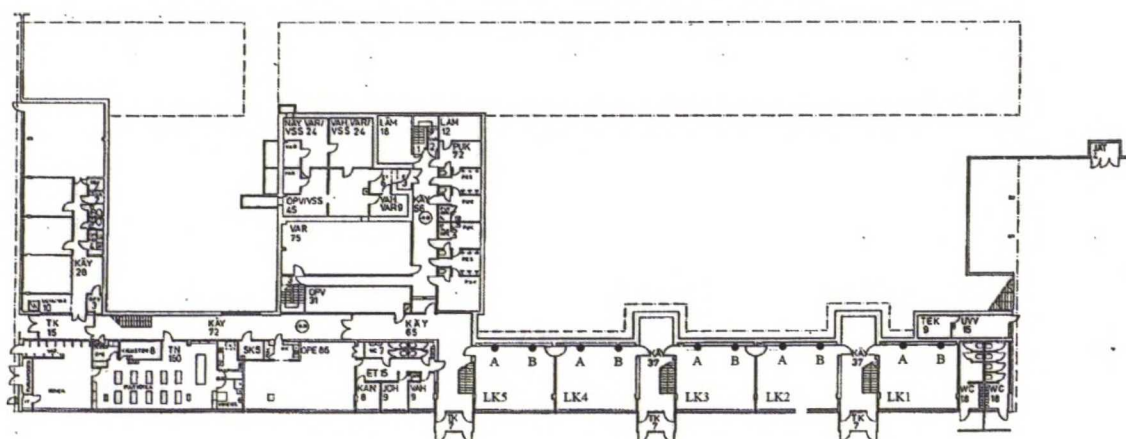
3.3 Tutkimuksen kohteena olevan koulun sisäilmasto-ongelmat

3.3.1 Kohteen perustiedot

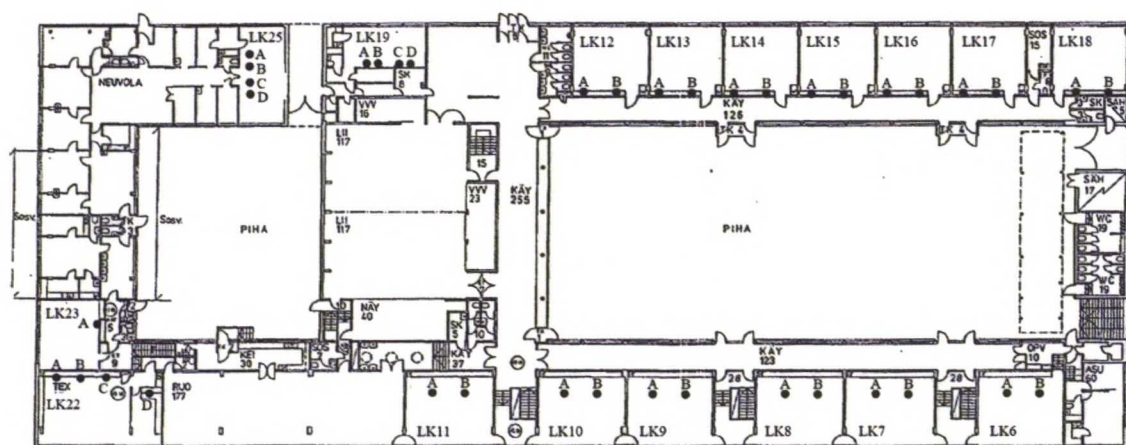
Tutkimuksen kohteena oleva koulu, Pihlajamäen ala-aste, on Helsingissä sijaitseva vuonna 1965 rakennettu betonirunkoinen koulurakennus. Ensimmäisessä kerroksessa sijaitsee seitsemän opetustilaa, opettajien huoneet, puku- ja peseytymistiloja, lämmönjakohuoneet, 230 m² kerhotila sekä VSS- tilat, jotka toimivat tällä hetkellä varastona. Toisessa kerroksessa on 14 opetustilaa, liikuntasali, keittiö- ja ruokailutilat, kaksi asuntoa sekä kouluterveydenhuolto- ja neuvolatiloja huoneistoalaltaan 420 m². [18] Kuvissa 1 ja 2 on esitetty Pihlajamäen ala-asteen pohjapiirustukset.

Kohteessa suoritettua haitta-aine- sekä rakenne- ja kosteusteknisen tutkimuksen mukaan kiinteistö olisi elinkaarensa puolesta kiireellisen peruskorjauksen tarpeessa [19, 20]. Rakenne- ja kosteusteknisten tutkimusten perusteella rakennusta palveleva koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä oli muutettava koneelliseksi tulo- ja poistoilmanvaihdoksi, sillä pelkkä koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä aiheutti rakennukseen suuren alipaineen, jolloin seinärakenteissa ilmenneet epäpuhtaudet saattoivat päästä huoneilmaan aiheuttaen oireita tilojen käyttäjissä.

Merkittäviä puutteita ulkoseinän sisäkuoren tiiveysongelmien lisäksi olivat puutteet alapohjan tiiveydessä, ikkunoiden huono kunto, vesikatteen huono kunto osassa rakennusta, lika, pöly ja orgaaninen aines putkikanaaleissa sekä ulkoseinän liikuntasaumojen puutteet. [19]



Kuva 1. Pihlajamäen ala-asteen 1. kerroksen pohjapiirustus



Kuva 2. Pihlajamäen ala-asteen 2. kerroksen pohjapiirustus

3.3.2 LVI-tekniisten laitteiden kunto

LVI-tekniisten laitteiden kunto oli vuonna 2002 tehdyn kuntoarvion mukaan asiallinen. Vesi- ja viemäriverkosto oli alkuperäinen vuodelta 1965, joten sen saneeraaminen oli kuntoarvion mukaan tehtävä lähivuosina. Lisäksi kuntoarvion mukaan lämmityspattereihin oli asennettava uudet termostaattiset patteriventtiilit lähiaikoina. Lämmitysverkostossa oli havaittu vuotoa jo usean vuoden ajan, mutta vuotoa ei ollut paikallistettu. Ilmastointilaitteet olivat kunnossa lukuun ottamatta liikuntasalin tuloilmakonetta sekä paria huippuimuria vesikatolla, jotka olivat elinkaarensa loppupäässä. [18]

3.3.3 Ala- ja välipohja

Rakennuksen alapohjan putkikanaalien tarkastusluukut eivät olleet tiiviitä, minkä lisäksi osassa kanaaleja havaittiin orgaanista ainesta, jonka pinnalla oli näkyvää mikrobikasvustoa. Tarkastusluukut piti tutkimuksen mukaan tiivistää sekä putkikanaalit alipaineistaa. Ilman korjaustoimenpiteitä tarkastusluukkujen epätiiveyden ja rakennuksen alipaineisuuden vuoksi putkikanaaleista saattoi kulkeutua epäpuhtauksia oleskelutiloihin. [19] Tarkastusluukkujen tiivistäminen suoritettiin alkuvuodesta 2012.

Ryömintätilat, jotka oli kunnostettu lähivuosien aikana kosteusongelmien vuoksi, olivat tutkimuksen mukaan pääosin siistit. Rakenne- ja kosteusteknisessä tutkimuksessa löytyi paikoitellen alueita, joissa kevytsorakerroksen pinta oli kostea, sekä pieniä alueita, joihin vanhoja muottilautoja oli jäänyt paikoilleen. Muottilautoissa havaittiin mikrobikasvustoa. Teknisten töiden tilan puulattian mineraalivillaeristeessä havaittiin kosteusvaurioon viittaavia *Aspergillus sydowi*itä sekä runsaasti *Streptomyces*ejä. [19]

3.3.4 Ulko- ja väliseinät

Ulkoseinien suurimmat puutteet liittyivät epätiivisiin liittyimiin erityisesti ikkunoiden kohdalla mutta myös läpivientien kohdalla. Tämä yhdistettynä rakennuksen alipaineisuuden mahdollistaa epäpuhtauksien kulkeutumisen rakenteista ja ulkoilmasta rakennuksen sisäilmaan. Merkkisavu- ja merkkiainekokeilla todettiin tutkimuksessa ilmavuotoja kaikissa ikkunaliittymissä, läpivienneissä, kuten patterien kiinnikkeissä, seinässä olevissa halkeamissa, alapohjan liittymissä sekä liikuntasaumojen kohdalla. [19]

3.3.5 Ikkunat

Ikkunoiden kunto oli tutkimuksen mukaan huono lähes koko rakennuksessa. Suurimpia puutteita olivat maalin hilseily, laastien ja kittausten mureneminen, listojen paikallinen irtoilu, puuosien halkeilu ja paikalliset pintaosien pehmentymiset. Ikkunoissa havaittiin myös runsaasti vesi- ja ilmatiiveyspuutteita. Vesitiiveyspuutteet olivat aiheuttaneet ikkunan väleihin ja sisäpuolisiin osiin kosteusvaurioita vuotojen takia. Ilmatiiveyspuutteet todettiin merkkisavun avulla.

Tutkimuksen yhteydessä ikkunarakenteisiin tehdyissä rakenneavauksissa havaittiin ilmavuotoja rakennuksen sisälle päin kaikissa avauksissa. Ikkunoiden puuosat olivat kui-

via. Ikkunan karmin ja ulkoseinän välin eristeenä oli pääosin rive, joskin paikoin se oli korvattu mineraalivillalla tai uretaanilla. Rakenneavausten yhteydessä erityisesti riveissä havaittiin mikrobiperäisiä hajuja. Avausten yhteydessä otettiin 15 materiaalinäytettä mikrobianalyysiä varten. Otetuista näytteistä yhdeksässä oli vahva viite mikrobivauriosta, yhdessä oli viite vauriosta ja viidessä ei ollut viitettä vauriosta. Mikrobianalyysin teki Työterveyslaitos. [19]

3.3.6 Ilmanvaihdon riittävyys

Kohteessa suoritettiin myös ilmamäärämittauksia luokkatiloissa ja hoitajanhuoneessa. Poistoilmat mitattiin ilmanvaihdon ollessa täydellä sekä puolella teholla. Normaalien luokkahuoneiden pinta-alat vaihtelivat 40–63 m² välillä. Tekstiilityön luokka oli pinta-alaltaan 85 m². Ilmamäärät poistoilmapuhaltimen käydessä täydellä teholla mitattiin 22 luokasta ja puolella teholla 19 luokasta. Kolmessa luokassa oli pysyvä poistoilmanvaihto, johon poistoilmapuhaltimen käyntiasento ei vaikuttanut. [19]

Ilmamäärämittauksissa poistoilmamäärät ilmanvaihdon käydessä täydellä teholla olivat keskimäärin 1,16 dm³/s neliötä kohden. Suurin arvo oli 1,65 dm³/s neliölle pienimmän arvon ollessa vain 0,60 dm³/s neliölle. Ilmanvaihdon käydessä puolella teholla keskiarvo ilmamäärille neliötä kohden oli 0,59 dm³/s. Suurin arvo oli 1,21 dm³/s ja pienin 0,35 dm³/s neliötä kohden. Yhden luokan pinta-alasta ei ollut saatavilla tietoa, joten kyseisen luokan ilmamäärää ei otettu mukaan vertailuun.

4 SEKOITTAVAN JA SYRJÄYTTÄVÄN ILMANJAON PERIAATTEET JA ILMANVAIHDON INDEKSIT

4.1 Ilmanjakotavan valinta

Ilmanjakotapa on valittava aina tilan ominaisuuksien mukaan. Sekä syrjäyttävässä että sekoittavassa ilmanjaossa on omat hyvät ja huonot puolensa. Syrjäyttävä ilmanjako soveltuu yleensä hyvin tiloihin, joissa on tavoitteena saavuttaa hyvä ilmanlaatu oleskelualueella. Tällaisia tiloja ovat muun muassa neuvotteluhuoneet, ravintolat, luokkahuoneet sekä korkeat tilat kuten teatterit. Syrjäyttävä ilmanjako sopii yleensä sekoittavaa ilmanjakoa paremmin tiloihin, joissa epäpuhtaudet ovat lämpimiä tai selvästi kevyempiä kuin

huoneilma ja silloin, kun suuria tuloilmavirtoja tuodaan pieniin huoneisiin. Syrjäyttävässä ilmanjaossa tuloilman on oltava huoneilmaa viileämpää, jotta se pääsee leviämään tilan lattiaa pitkin.

Sekoittava ilmanjako puolestaan sopii tiloihin, joissa ilmanlaatu ei ole erityinen ongelma. Tällaisia tiloja ovat muun muassa yksittäiset toimistohuoneet. Myös matalissa alle 2,3 metrin korkuisissa huoneissa sekoittava ilmanjako saattaa olla syrjäyttävää käyttökelpoisempi. Jos tilassa on paljon ilmanjakoa sekoittavia ja häiritseviä ilmavirtauksia, tai jos epäpuhtaudet ovat viileämpiä tai raskaampia kuin huoneilma, on sekoittava ilmanjako sopivampi ratkaisu. [21] Myös käytettäessä ilmalämmitystä, on sekoittava ilmanjako syrjäyttävää parempi ratkaisu.

4.2 Sekoittava ilmanjako

Sekoittava ilmanjako on yleisimmin käytetty ilmanjakotapa etenkin asuin- ja toimistokiinteistöissä. Siinä tilaan tuodaan puhdasta tuloilmaa, joka pyritään sekoittamaan mahdollisimman tehokkaasti huoneilman kanssa. Ilmavirtojen mitoitus, ilman laadun laskenta ja tilan lämpöolosuhteet perustuvat epäpuhtauksien ja huoneilman täydelliseen sekoittumiseen. Tällöin hengitysvyöhykkeellä ja poistoilmassa epäpuhtauksien pitoisuudet ja ilman lämpötila ovat likimain yhtä suuret.

Sekoittavassa ilmanjaossa pyritään poistamaan epäpuhtauksien haittavaikutukset laimentamalla niiden pitoisuudet riittävän alhaisiksi ja pitämään lämpöolosuhteet vakiona koko huonetilavuudessa. Sekoittavalle ilmanvaihdon tunnusomaisia piirteitä täydellisesti sekoittuneen huoneilman lisäksi ovat suurehko tuloilman lähtönopeus tuloilmalaitteesta (2-10 m/s), tuloilman 5...10 °C alilämpöisyys huoneilmaan nähden sekä se, että suihkun kattoon ja seiniin kiinnittymistä hyödynnetään suihkun liikeradan hallinnassa. [22]

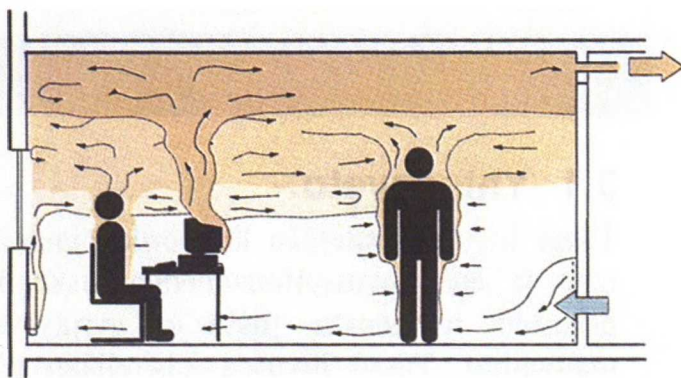
Sekoittavassa ilmanjaossa voidaan oleskeluvyöhykkeen ulkopuolella käyttää korkeita nopeuksia ja sekoittaa oleskeluvyöhykettä esimerkiksi tuloilmasuihkuun indusoituvan paluuvirtauksen avulla. [22] On kuitenkin varmistuttava siitä, ettei ilman nopeus oleskeluvyöhykkeellä kasva liian suureksi, sillä liian suuret ilman nopeudet aiheuttavat helposti vedon tunnetta ilman lämpötilan ollessa viihtyvyysalueen alarajoilla [3].

4.3 Syrjäyttävä ilmanjako

Syrjäyttävää ilmanjakoa on käytetty jo pitkään teollisuustiloissa, joissa on suuret lämpökuormat. Syrjäyttävää ilmanvaihtoa alettiin käyttää 1980-luvun puolivälistä yhä enemmän myös muissa kuin teollisuuslaitoksissa, etenkin Pohjoismaissa. Viime vuosina syrjäytysilmanvaihto on saanut osakseen kiinnostusta kaikkialla maailmassa. [21]

Syrjäyttävä ilmanjako poikkeaa merkittävästi periaatteiltaan sekoittavasta ilmanjaosta. Syrjäytysilmanvaihto perustuu tiheyseroihin, joiden avulla huoneilma jaetaan kahteen vyöhykkeeseen: ylemmässä vyöhykkeessä on epäpuhtauksia sisältävää lämmintä ilmaa ja alemmassa vyöhykkeessä puhdasta viileämpää ilmaa.

Syrjäyttävässä ilmanjaossa hyödynnetään tilassa olevien lämmönlähteiden aiheuttamaa pystysuoraa vapaata konvektiovirtausta. Alilämpöinen tuloilma johdetaan tilan alaosaan pienellä nopeudella ja lämmin epäpuhtauksia sisältävä ilma kerääntyy tilan yläosaan, mistä se poistetaan. Kuvassa 3 on esitetty syrjäytysilmanvaihdon periaatteellinen toiminta. Erityisesti tiloissa, joissa on paljon lämpimiä epäpuhtauslähteitä kuten ihmisiä, on syrjäyttävällä ilmanjaolla mahdollista saada aikaan sekoittavaa ilmanjakoa tehokkaampi ilmanvaihto. [22]



Kuva 3. Ilman virtauksen periaatekuva syrjäytysilmanvaihdossa [21]

Luonnolliset konvektiovirtaukset ovat syrjäytysilmanvaihdon käyttövoima, joten niiden suuruus on tunnettava. Luonnollisella konvektiovirtauksella tarkoitetaan ilmavirtausta, joka nousee lämpimien esineiden, pintojen, laitteiden sekä ihmisten päällä. Konvektiovirtaus voi olla myös laskeva, tällöin sen aiheuttaa kylmä esine tai pinta. Kaikki käy-

tännössä esiintyvät konvektiovirtaukset ovat turbulenttisia ja noudattavat täysin kehittyneen turbulenttisen virtauksen lakeja. [21]

Syrjäyttävää ilmanjakoa käytettäessä on pidettävä huolta siitä, että alilämpöinen tuloilma ei aiheuta vetoa tuloilmapäätelaitteen lähistöllä. [21] Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että tuloilmalaitteen eteen lähivyöhykkeelle ei pitäisi sijoittaa työskentelypistettä, kuten pulpettia. Luokkahuoneissa tämä saattaa kuitenkin muodostua ongelmaksi tilanpuutteen vuoksi. Syrjäyttävää ilmanjakoa käytettäessä on tärkeää valita tuloilmapäätelaitteet ja niiden puhalluskuvio tapauskohtaisesti. Esimerkiksi koululuokassa ratkaisuna saattaa toimia tuloilman puhaltaminen seinien suuntaisesti, jolloin tuloilmasuihku ei suuntaudu suoraan oleskelualueelle.

Syrjäyttävä ilmanjako saattaa aiheuttaa tyytymättömyyttä lämpötilaolosuhteisiin, jos lämpötilan vertikaalinen muutos on liian suuri oleskelualueella. Tästä syystä vertikaalinen lämpötilamuutos ei saisi ylittää arvoa $2-3\text{ }^{\circ}\text{C/m}$.

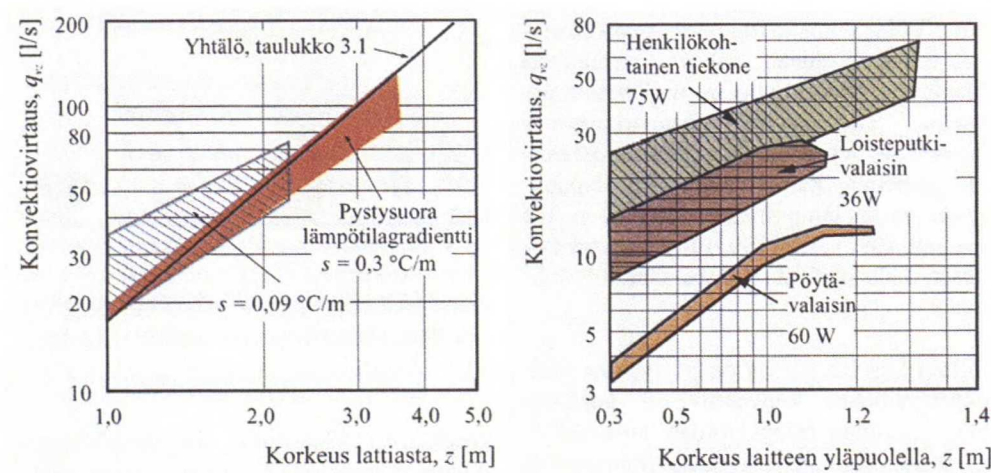
4.3.1 Tuloilmavirran mitoitus ilmanlaatuun perustuen

Syrjäyttävässä ilmanjaossa tuloilman määrä voidaan mitoittaa perustuen joko ilmanlaatuun tai lämpöviihtyvyyteen. Ilmanlaatuun perustuvassa tuloilman mitoitusmenetelmässä on tavoitteena jakaa huone vertikaalisesti puhtaaseen ja epäpuhtauksia sisältävään vyöhykkeeseen. Tuloilmavirran on oltava yhtä suuri kuin konvektiivisten nostevirtauksien summa rajavyöhykkeellä. Tavallisesti vyöhykkeiden välinen raja valitaan hieman hengitysvyöhykkeen yläpuolelta.

Ilmanlaatuun perustuvassa menetelmässä on tärkeää huomioda se, että epäpuhtauksien kerrostumista tapahtuu vain kun epäpuhtauslähde on lämpimän nostevirtauksen ympäröimänä tai epäpuhtaus on ilmaa kevyempää. Epäpuhtauspitoisuuteen vaikuttavat myös alaspäin suuntautuvat konvektiovirtaukset. Esimerkiksi kylmänä vuodenaikana huonosti lämpöeristetty ulkoseinä saattaa aiheuttaa alaspäin suuntautuvan ilmavirtauksen, joka kuljettaa epäpuhtauksia ylemmältä vyöhykkeeltä takaisin alemmalle vyöhykkeelle. [21]

Suunnittelu etenee siten, että ensin valitaan ylemmän ja alemman vyöhykkeen raja, yleensä hieman hengitysvyöhykkeen yläpuolelta. Kun vyöhykkeiden raja on valittu, on laskettava konvektiovirtaukset vyöhykkeiden rajan korkeudella.

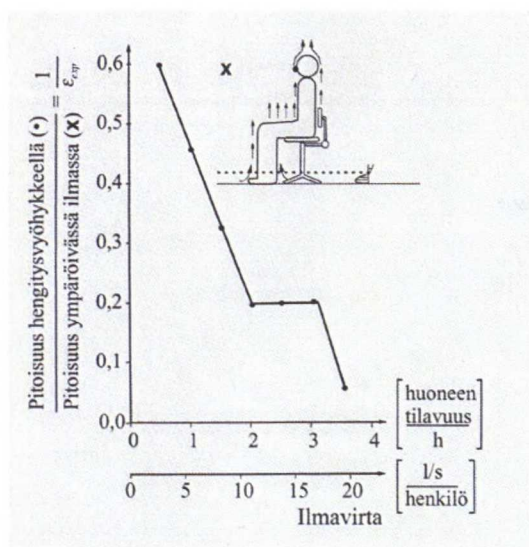
Nostevirtauksille piste- ja viivalähteiden päällä on johdettu kaavat, mutta niissä oletetaan, että lämmönlähteen koko on pieni ja sillä ei ole todellisia mittoja. Tästä syystä arvioitaessa ihmisten tai todellisten esineiden aiheuttamien konvektiivisten nostevirtaus-ten suuruutta, voidaan käyttää Nielsenin teoreettisten tarkastelujen ja mittausten perusteella tekemää yhteenvetoa konvektiovirtauksista [21]. Yhteenveto konvektiovirtauksis-ta ihmisten ja esineiden yläpuolella toimisto- ja vastaavissa tiloissa on esitetty kuvassa 4.



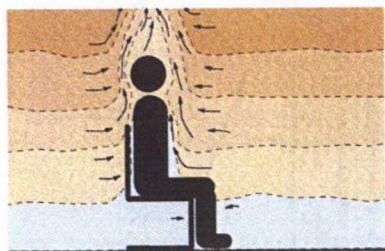
Kuva 4. Paikallaan olevan henkilön ($\Phi = 100 \text{ W}$) ja eri laitteiden synnyttämä konvektiivinen tilavuusvirta q_{vz} korkeudella z lattian tasosta [21]

Kuvan 4 mukaan istuvan ihmisen yläpuolella korkeudella 1,3 metriä lattiasta konvek-tiovirtaus on suuruusluokkaa $20 \text{ dm}^3/\text{s}$. Tämä tarkoittaa sitä, että jos halutaan pitää raja-vyöhyke hengitysalueen yläpuolella, tulisi jokaista istuvaa henkilöä kohden tuoda tilaan $20 \text{ dm}^3/\text{s}$ tuloilmaa.

Käytännössä kuitenkin tuloilman määrä voi usein olla pienempi, sillä johtuen ihmisen aiheuttamasta pystysuuntaisesta konvektiovirtauksesta (kuva 6) puhdasta ilmaa virtaa alemmalta vyöhykkeeltä hengitysvyöhykkeelle. Tästä syystä hengitetyn ilman epäpuh-tauspitoisuus on pienempi kuin oleskelualueen ilman pitoisuus ja rajavyöhyke voi sijaita hengitysvyöhykkeen rajaa alempana. Kuvassa 5 on esitetty hengitysvyöhykkeen ja ym-päröivän ilman pitoisuuksien suhde samalla korkeudella. [21]



Kuva 5. Hengitysvyöhykkeen ja ympäröivän ilman pitoisuuksien suhde samalla korkeudella [21]



Kuva 6. Konvektiovirtaus henkilön ympärillä [21]

Vaikka alle $20 \text{ dm}^3/\text{s}$ tuloilmavirroilla henkilöä kohti ylemmän ja alemman vyöhykkeen välinen rajakerros onkin hengitysvyöhykkeen alapuolella, kuvasta 5 nähdään, että tuloilmavirran ollessa esimerkiksi $5 \text{ dm}^3/\text{s}$ henkilöä kohden, on hengitysvyöhykkeen epäpuhtauspitoisuus noin 50 % ympäröivän ilman epäpuhtauspitoisuudesta. $10 \text{ dm}^3/\text{s}$ ilmavirralla henkilöä kohden pitoisuus hengitysvyöhykkeellä on vain noin 20 % ympäröivän ilman pitoisuudesta.

4.3.2 Tuloilmavirran mitoitus lämpöviihtyvyyteen perustuen

Lämpöviihtyvyyteen perustuvassa menetelmässä tuloilmavirta mitoitetaan siten, että ylimääräinen lämpö poistetaan oleskeluvyöhykkeeltä ja siellä saavutetaan lämpöviihtyvyys. Tämä tarkoittaa sitä, että ensin on määriteltävä ilmanvaihdolla tilasta poistettava

lämpökuorma sekä oleskeluvyöhykkeen lämpötilavaatimukset, eli lattiatason minimilämpötila ja oleskeluvyöhykkeen yläosan maksimilämpötila. Lämpötilaero lattian ja oleskeluvyöhykkeen yläosan välillä valitaan siten, että pystysuora lämpötilagradientti ei aiheuta epäviihtyisyyttä. [21]

Huoneesta ilmanvaihdoilla poistettava kokonaislämpömäärä saadaan kaavalla:

$$\Phi_{tot} = q_V \rho_i c_{pi} (\theta_e - \theta_s) \quad (2)$$

missä

Φ_{tot} on huoneesta poistettu lämpöteho [W]

q_V on ilmavirta [m^3/s]

ρ_i on ilman tiheys [kg/m^3]

c_{pi} on ilman ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$]

θ_e on poistoilman lämpötila [$^\circ\text{C}$]

θ_s on tuloilman lämpötila [$^\circ\text{C}$].

Lämpötilaero lattian ja poistoilman välillä voidaan olettaa olevan puolet tuloilman ja poistoilman välisestä lämpötilaerosta [21]. Tällöin tuloilman ja poistoilman väliseksi lämpötilaeroksi saadaan:

$$\theta_e - \theta_s = 2 \cdot (\theta_e - \theta_f) \quad (3)$$

missä

θ_f on lämpötila lattian rajassa [$^\circ\text{C}$].

Poistoilman ja lattian rajan ilman lämpötilojen erotus saadaan huoneen korkeuden ja suurimman sallitun pystysuuntaisen lämpötilaeron avulla:

$$\theta_e - \theta_f = hs \quad (4)$$

missä

h on huoneen korkeus [m]

s on suurin sallittu pystysuuntainen lämpötilaero [$^\circ\text{C}/\text{m}$].

Lattian lämpötilaksi voidaan olettaa lämpötilavaatimusten mukainen minimilämpötila (esimerkiksi 20 °C), sillä syrjäyttävässä ilmanjaossa oleskelualueella matalin lämpötila esiintyy lattian lähellä.

4.4 Ilmanvaihdon tehokkuus ja siihen liittyvät indeksit

Ilmanjaon toteutustapa vaikuttaa ilmanvaihdon tehokkuuteen. Ilmanvaihto on sitä tehokkaampaa mitä pienemmällä ilmamäärällä tilaan saadaan viihtyisät olosuhteet. Ilmanjaon toteutuksella on suuri vaikutus myös siihen, miten viihtyisäksi tilojen käyttäjät kokevat sisäilmaston. Käyttäjien kannalta toteutettu ilmanjakoratkaisu on onnistunut, jos ilmanvaihtoon liittyviin seikkoihin, kuten vetoon, meluun ja ilmanlaatuun ei tule kiinnitettyä erityistä huomiota. Kaikkiin tapauksiin soveltuvaa yhtä ainoaa ilmanjakotapaa ei ole olemassa, vaan ilmanvaihtoratkaisua valittaessa on otettava huomioon huonetilan erityiset ominaisuudet. On myös varmistuttava, että valittu sisäilmaston laatuluokka toteutuu suunnittelemalla järjestelmä oikein. [22] Ilmanvaihdon tehokkuutta ja sen viihtyisyyttä voidaan mitata monilla indekseillä, jotka kuvaavat ilmanvaihdon määrää tai ilmanvaihdon avulla tilaan saatuja lämpöolosuhteita ja ilman laatua.

4.4.1 Epäpuhtauksien poistotehokkuus

Epäpuhtauksien poistotehokkuus saadaan kun verrataan poistoilman ja tuloilman epäpuhtauspitoisuuksien erotusta oleskelualueen ja tuloilman epäpuhtauspitoisuuksien erotukseen.

$$\varepsilon_c = \frac{c_e - c_s}{c_{oz} - c_s} \quad (5)$$

missä

ε_c on epäpuhtauksien poistotehokkuus [-]

c_e on poistoilman epäpuhtauspitoisuus [ppm]

c_s on tuloilman epäpuhtauspitoisuus [ppm]

c_{oz} on oleskelualueen epäpuhtauspitoisuus [ppm].

4.4.2 Lämpötilahyötysuhde

Lämpötilahyötysuhde määritellään poistoilman ja tuloilman lämpötilojen erotuksen suhteena oleskelualueen ja tuloilman lämpötilojen erotukseen.

$$\varepsilon_t = \frac{t_e - t_s}{t_{oz} - t_s} \quad (6)$$

missä

ε_t on lämpötilahyötysuhde [-]

t_e on poistoilman lämpötila [°C]

t_s on tuloilman lämpötila [°C]

t_{oz} on oleskelualueen lämpötila [°C].

4.4.3 Lämpöviihtyvyys

Vaikka lämpötilahyötysuhteen ja epäpuhtauksien poistotehokkuuden korkeat arvot tarkoittavatkin tehokasta ilmanvaihtoa, eivät edellä mainitut suureet yksinään riitä ilmaistamaan lämpöviihtyvyyttä ja ilman laatua oleskelualueella. Lämpöviihtyvyyden arvioimiseen sopii paremmin seuraava yhtälö:

$$N_t = \frac{\varepsilon_t}{PPD} \quad (7)$$

missä

PPD on lämpöolosuhteisiin tyytymättömien osuus (engl. Predicted Percentage of Dissatisfied) [%].

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2) \quad (8)$$

missä

PMV on suuren ihmisjoukon keskimääräinen lämpöaistimus ympäristön lämpöolosuhteista (engl. Predicted Mean Vote).

Yksilöllisistä eroista johtuen samat lämpöolosuhteet eivät miellytä kaikkia. Vaikka keskimäärin lämpöolosuhteet koettaisiin viihtyisinä ($PMV = 0$), on silti vähintään 5 % tyy-

tymättömiä. Kun $-0,5 \leq PMV \leq 0,5$, on tyytymättömien osuus noin 10 % ja olosuhteita voidaan pitää hyvinä [3].

4.4.4 Ilman laatu

Ilman laadun arvioimiseen sopii seuraava yhtälö:

$$N_c = \frac{\varepsilon_c}{PD_{AQ}} \quad (9)$$

missä

PD_{AQ} on ilman laatuun tyytymättömien osuus (engl. percentage of dissatisfied) [%].

PD_{AQ} saadaan seuraavasti:

$$PD_{AQ} = 395 \cdot \exp(-1,83q_v^{0,25}) \quad (10)$$

missä

q_v on ilmamäärä, dm^3/s , hlö.

Ilman laadun mittari N_c ja lämpöviihtyvyyden mittari N_t antavat hyvän kokonaiskuvan tilan ilman laadusta ja lämpöolosuhteista. Awbi huomasi kuitenkin tutkimuksessaan, että vaikka N_c ja N_t arvot viittasivat hyviin olosuhteisiin, esiintyi paikallista epävihtyvyyttä sekoittavassa ilmanjaossa alilämpöisen ilmasuihkun irrottua katosta liian aikaisin ja pudottua oleskelualueelle. Tästä syystä edellä esitettyjä indeksejä N_c ja N_t tulisikin käyttää yhdessä huoneilman virtauskentän kanssa arvioitaessa sisäolosuhteita. [23]

4.4.5 Ilmanjakoindeksi

Kun N_c ja N_t yhdistetään, saadaan ilmanjakoindeksi ADI (engl. Air Distribution Index), joka määrittelee ilmanjakosysteemin tehokkuutta sekä ilman laadun että lämpöolosuhteiden osalta. [24]

$$ADI = (N_t \cdot N_c)^{0,5} \quad (11)$$

4.4.6 Hiilidioksidipitoisuus epäjatkuvuustilassa

Huoneen tilavuus vaikuttaa epäpuhtauspitoisuuteen muutostilanteessa, kuten epäpuhtaustuoton alkaessa. Koululuokissa hiilidioksidipitoisuus ei välttämättä ehdi saavuttaa tasapainotilan pitoisuutta, riippuen huoneen tuloilmamäärästä ja huonetilavuudesta. Hiilidioksidipitoisuuden kasvu epäjatkuvuustilassa ajan funktiona voidaan kuitenkin laskea.

Hiilidioksidipitoisuus ajan funktiona saadaan kaavalla:

$$C = C_0 e^{-t/\tau} + C_\infty (1 - e^{-t/\tau}) \quad (12)$$

missä

C on hiilidioksidipitoisuus ajan hetkellä [ppm]

C_0 on taustapitoisuus [ppm]

t on aika [h]

C_∞ on hiilidioksidipitoisuus tasapainotilassa [ppm]

τ on ilmanvaihdon aikavakio [h].

Kun tunnetaan hiilidioksidin tuotto, hiilidioksidin taustapitoisuus ja tuloilmamäärä, voidaan tasapainotilan hiilidioksidipitoisuus ratkaista seuraavasti:

$$C_\infty = \frac{C_0 q + \dot{m}}{q} \quad (13)$$

C_∞ on tasapainotilan hiilidioksidipitoisuus [ppm]

C_0 on hiilidioksidin taustapitoisuus [ppm]

\dot{m} on epäpuhtauksien tuotto [cm^3/s].

Ilmanvaihdon aikavakio saadaan seuraavasti:

$$\tau = \frac{V}{q} \quad (14)$$

missä

V on ilmanvaihtoon osallistuva huonetilavuus [m^3]

q on ilmanvaihdon kokonaisilmavirta [m^3/s].

4.5 Ilmanjakotapoihin liittyvä tutkimus

Eri ilmanjakotapoja on vertailtu viimeisten vuosikymmenien ajan intensiivisesti ja julkaistuja tutkimuksia on hyvin paljon. Monessa tutkimuksessa on tehty sekä CFD-simulaatio (engl. Computational Fluid Dynamics) että kenttä- tai laboratoriomittauksia, joita on vertailtu simulaation antamiin tuloksiin ja joilla on vahvistettu CFD-simulaation paikkansapitävyys. Kenttä- tai laboratoriomittausten tuloksia, kuten huoneen pintojen lämpötiloja on myös käytetty reunaehtoina CFD-mallia tehtäessä. [23, 24, 25, 26, 27]

Sekoittavassa ilmanjaossa ilman nopeudet oleskelualueella ovat monen tutkimuksen mukaan korkeampia kuin syrjäyttävässä ilmanjaossa [26, 28, 29]. Liian korkeat ilman nopeudet lisäävät vedon tunteen riskiä. Sekoittavassa ilmanjaossa korkeita nopeuksia ilmenee sekä lattian rajassa että oleskelualueen ylemmissä osissa 1,1 ja 1,7 metrin korkeuksilla. [30, 31] Syrjäyttävässä ilmanjaossa ilman nopeus on korkeimmillaan tuloilmalaitteen lähivyöhykkeellä 0,02-0,05 metrin korkeudella lattiasta [21, 32]. Ilman nopeus lähivyöhykkeen ulkopuolella ja lattiarajan yläpuolella oleskelualueella on kuitenkin alhainen. Päätelaitteiden tyyppi ja sijoitus vaikuttaa oleskeluvyöhykkeellä ilmeneviin ilman nopeuksiin sekä sekoittavassa että syrjäyttävässä ilmanjaossa [29, 30, 33].

Syrjäyttävällä ilmanjaolla voidaan joidenkin tutkimuksien mukaan saavuttaa sekoittavaa ilmanjakoa parempi epäpuhtauksien poistotehokkuus [25, 28]. Jurelionisin luokkahuoneen ilmanjakoa käsittelevässä tutkimuksessa sekoittavalla ilmanjaolla saavutettiin 107 % epäpuhtauksien poistotehokkuus arvon ollessa syrjäyttävällä ilmanjaolla 172 % [25]. Varodompunin asuinhuoneiston ilmanjakoa käsittelevässä tutkimuksessa syrjäyttävällä ilmanjaolla saavutettiin noin 130-180 % epäpuhtauksien poistotehokkuus jäähdytystehontarpeen vaihdellessa välillä 9-160 W/m². Sekoittavalla ilmanjaolla saavutettiin vastaavasti 115-130 % epäpuhtauksien poistotehokkuus. [28]

On kuitenkin tutkimuksia, joiden mukaan epäpuhtauksien poistotehokkuudessa ei sekoittavan ja syrjäyttävän ilmanjaon välillä ole merkittäviä eroja. Awbin toimistohuoneen ilmanjakoa käsittelevässä tutkimuksessa sekoittavan ja syrjäyttävän ilmanjaon epäpuhtauksien poistotehokkuudessa ei ollut selvää eroa, vaan ne olivat lähes yhtä suuria epäpuhtauksien poistotehokkuuden ollessa välillä 96-104 % kummassakin ilmanjakotavassa. Lämpötilahyötysuhde oli Awbin mukaan selvästi parempi syrjäyttävässä

kuin sekoittavassa ilmanjaossa. Syrjäyttävän ilmanjaon lämpötilahyötysuhde vaihteli välillä 268-284 % sen ollessa sekoittavassa 135-153 %. [23]

Karimipannahin ym. toimistohuoneen ilmanjakoa käsittelevässä tutkimuksessa sekoittavan ja syrjäyttävän ilmanjaon keskimääräinen epäpuhtauksien poistotehokkuus huonetilassa oli yhtä suuri, 118 % [24]. Toisessa Karimipannahin ym. luokahuoneen ilmanjakoa käsittelevässä tutkimuksessa saatiin CFD-mallinnuksessa syrjäyttävän ilmanjakotavan epäpuhtauksien poistotehokkuudeksi 87,9-105,3 % riippuen käytetystä tuloilman lämpötilasta, ilmamäärästä ja ilmanjakolaitteiden lukumäärästä. Lämpötilahyötysuhde puolestaan vaihteli samassa tutkimuksessa välillä 58,4-156,2 %. [27]

Norbäckin tutkimuksessa tutkittiin miten ilmanjakotapa vaikuttaa terveyteen. Tutkimuksessa vertailtiin kolmessa ala-asteen luokassa eri ilmanjakotapoja ja niiden vaikutusta oppilaiden terveyteen. Kaksi luokkaa valittiin kontrolliluokiksi, joiden ilmanjakotapana säilytettiin olemassa oleva syrjäyttävä ilmanjako. Kolmannessa luokassa ilmanjakotapaa vaihdettiin viikon välein oppilaiden tietämättä sitä. Ilmanjakotapoina käytettiin kolmannessa luokassa ensin sekoittavaa ilmanjakoa, sitten syrjäyttävää ilmanjakoa perinteisin ilmanjakopäätelaittein ja viimeisenä viikkona syrjäyttävää ilmanjakoa tekstiili-ilmanjakopäätelaittein. Tuloilmamäärät ja tuloilman lämpötila pidettiin vakiona kaikissa luokissa. [34]

Tutkimuksessa oppilaille tehtiin lääkärin suorittama kysely sekä lääketieteelliset tutkimukset. Tutkimukseen osallistui yhteensä 61 oppilasta. Tutkimuksen mukaan syrjäyttävän ilmanjaon kahden tutkitun toteutustavan välillä ei ollut merkittäviä eroja liittyen oppilaiden terveyteen. Syrjäyttävän ja sekoittavan ilmanjaon välillä eroja puolestaan oli. Sekoittavaa ilmanjakoa käytettäessä oppilaat kokivat ilman laadun huonommaksi. Tämän lisäksi sekoittavaa ilmanjakoa käytettäessä oppilailta ilmeni enemmän kurkkuaireita, hengitysvaikeuksia ja päänsärkyä.

Syrjäyttävää ilmanjakoa käytettäessä luokan ilma sisälsi sekoittavaa ilmanjakoa vähemmän elinvoimaisia bakteereja ja homeita, mutta bakteerien ja homeiden kokonaismäärä oli kuitenkin syrjäyttävässä suurempi. Sekoittavassa ilmanjaossa hiilidioksidipitoisuus pulpetin tasolla oli 867 ppm ja syrjäyttävässä 655 ppm. Lisäksi syrjäyttävässä ilmanjaossa lämpötila oli 1 °C:een alhaisempi. Tutkimuksen mukaan syrjäyttävää il-

manjakoa käytettäessä koululuokissa saatetaan saavuttaa positiivisia terveysvaikutuksia sekä parantaa oppilaiden kokemaa ilman laatua. [34]

5 TILAKOHTAINEN ILMASTOINTIKONE

5.1 Tilakohtaisen ilmanvaihtokoneen toteutusvaihtoehdot

Tilakohtainen ilmastointikone tarkoittaa nimensä mukaisesti konetta, joka palvelee tiettyä tilaa. Kone voi olla niin sanottu kaappikone, jolloin tilaan ei tarvita ilmanvaihtoa varten muuta kanavointia kuin raitis- ja jäteilmalle. Näiden kanavointi toteutetaan esimerkiksi korvaamalla tuuletusikkuna lämmöneristetyllä levyratkaisulla, johon tehdään kanaville läpiviennit. Tulo- ja poistoilman päätelaitteet on integroitu ilmastointikoneeseen. Tutkimuskohteessa ilmanvaihto toteutettiin kaappikoneella syrjäyttävällä ilmanjakoperiaatteella.

Toinen tapa on asentaa asuntoilmanvaihtoon tarkoitettu ilmastointikone tilaan, tai mahdollisuuksien mukaan tilan ulkopuolelle kuten varastoon tai käytävälle. Ilmastointikone voidaan asentaa esimerkiksi katon rajaan telineelle. Tässä vaihtoehdossa tarvitaan kanavointia enemmän, sillä jäte- ja raitisilmakanavien lisäksi koneelta lähtevät tulo- ja poistoilmakanavat. Asuntoilmanvaihtoon tarkoitettu kone saattaa myös vaatia erillisen koteloinnin ääniongelmien välttämiseksi. Ilmanjako edellä mainitussa koneessa voidaan toteuttaa joko syrjäyttävällä tai sekoittavalla tavalla.

5.2 Ilmastointikone integroidulla tulo- ja poistoilmalla

5.2.1 Ilmastointikoneen tekniset tiedot

Tutkimuskohteena olevassa koulussa käytettiin kaappikonetta (Swegon Compact Air 02), jonka alaosassa on integroitu piennopeuslaite tuloilmalle. Tämä ratkaisu perustuu syrjäyttävään ilmanjakoon, sillä siinä tuodaan alilämpöistä ilmaa oleskelualueelle koneen alaosaan. Poistoilma otetaan koneeseen sen yläosaan. Koneen tulo- ja poistopuhaltimet ovat suoravetoisia kammiopuhaltimia, joissa on EC-moottorit. Koneessa on lisäksi sekä poistoilma- että tuloilmasuodattimet suodatinluokalla F7, pyörivä lämmönsiirrin, äänenvaimentimet, integroitu ohjauslaitteisto sekä 1,1 kW sähkölämmityspatterit tuloilman jälkilämmitystä varten. [35]

Tutkimuksessa käytetyn ilmastointikoneen ilmamäärä on minimissään 80 dm³/s ja maksimissaan 230 dm³/s [35]. Koululuokassa edellä mainittu ilmamäärä on yleensä riittävä,

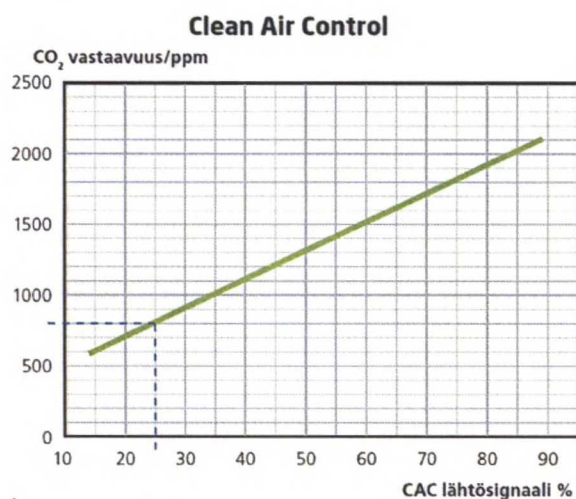
sillä noin 200 dm³/s ilmamäärä riittää rakentamismääräysten mukaiseen 6 dm³/s tuloil-
mamäärään henkilöä kohden 33 henkilölle. Luokkien oppilasmäärä on harvoin tätä kor-
keampi.

Koneen leveys on 1102 mm, syvyys 788 mm ja korkeus 2114 mm. Paino on 331 kg.
Koneen tuloilmasäleikön korkeus on noin 900 mm ja siinä on säädettävät etu- ja si-
vusuuttimet, joiden avulla puhalluskuviota voidaan muuttaa. Koneessa on halkaisijal-
taan 250 mm kanavalähdöt jäte- ja raitisilmakanaville. Sähköliitäntä toteutetaan 1-
vaiheisena 230 V/10 A liitännällä. [35]

5.2.2 Ilmastointikoneen automatiikka ja ohjaus

Compact Air –ilmastointikone on varustettu sisäänrakennetulla automatiikalla. Asetuk-
siin pääsee käsiksi joko koneen ovelle olevan näyttöpäätteen tai tietokoneen avulla.
Konetta voidaan myös tarkkailla ja koneen asetusarvoja säätää internet-selaimen väli-
tyksellä. Tällöin ilmastointikoneen on oltava tietoverkkoon kytkettynä. Ilmastointiko-
neella on yksilöllinen IP-osoite, jonka kautta yhteys muodostetaan. Koneen asetuksissa
on kolme eri tasoa, jotka kaikki on suojattu salasanalla. Näin koneeseen perehtymätön
henkilö ei pääse muuttamaan automatiikan asetusarvoja. [35]

Kone voidaan säätää vakioilmavirralla, jonka suuruus käyttäjän on määriteltävä, tai tar-
peenmukaiselle ohjaukselle. Tarveohjauksessa puhaltimen tuottamaa ilmavirtaa ohja-
taan ulkoisen tai sisäisen anturin mittaustiedon perusteella. Vakiovarusteena koneessa
on sisäinen CAC-anturi (engl. Clean Air Control). Koneessa on myös liitännät ulkoisille
CO₂- ja lämpötila-antureille, jotka voidaan sijoittaa huonetilaan. Ohjausviesti saadaan
ulkoisen anturin ollessa kyseessä 0-10 VDC jännitteenä. Sisäistä CAC-anturia käytettä-
essä puhaltimen ohjaus tapahtuu PWM -signaalin (engl. Pulse Width Modulation) avul-
la. [35] Kuvassa 7 on esitetty valmistajan käsityksen mukainen CO₂- ja CAC-
pitoisuuden vastaavuus [36].



Kuva 7. CO₂-pitoisuuden ja CAC-ohjaussignaalin vastaavuus valmistajan mukaan [36]

Koneeseen määritetään aina asetusarvo pienelle sekä isolle ilmavirralle, joiden rajoissa ilmastointikoneen ilmamääriä ohjataan. Tarveohjauksessa koneeseen on määritettävä lisäksi asetusarvo pienen ja ison ilmavirran ohjaussuureelle. Ohjaussuureen asetusarvo määritetään prosentuaalisena osuutena käytettävän anturin mittausalueesta. Jos esimerkiksi käytetään ulkoista CO₂-anturia, jonka mittausalue on 0-2000 ppm (0-10 VDC) ja hiilidioksidipitoisuus huoneessa halutaan pitää 1000 ppm:ssä (5 VDC), asetetaan ohjaussuureen asetusarvoksi 50 %. [35]

Anturin mitatessa asetusarvoja alhaisempia epäpuhtauspitoisuuksia ilmastointikoneen tulo- ja poistoilmavirrat säädetään asetettuihin minimi-ilmavirtoihin. Kun anturi mittaa asetusarvoja korkeampia pitoisuuksia, suurennetaan tulo- ja poistoilmavirtoja portaattomasti, kunnes saavutetaan asetusarvo tai maksimi-ilmavirta. [35]

Tuloilman lämpötilaa voidaan säätää suhteessa poistoilman lämpötilaan. Ilmastointikoneessa on valmiiksi asetellut käyrät tuloilman lämpötilan asetusarvolle suhteessa poistoilman lämpötilaan. Valmiiden asetusten lisäksi koneeseen voi manuaalisesti asettaa yksilöllisen käyrän, joka säätelee tulo- ja poistoilman lämpötilojen riippuvuutta toisistaan halutulla tavalla. [35]

Ilmastointikoneessa on sisäänrakennettu aikaohjelma, johon voidaan määrittää koneen viikoittaiset käyntiajat. Ilmastointikone voidaan yhdistää myös kiinteistön keskitettyyn rakennusautomaatiikkaan, josta se saa käyntiluvan. [35]

Ilmastointikone käyttää automaattista tiheyskorjausta ilmavirralle. Tämä tarkoittaa sitä, että ulkolämpötilan ja siten myös ilman tiheyden vaihdellessa ilmastointikoneen automatiikka korjaa ilman tilavuusvirran vastaamaan asetusarvoa. [35]

5.3 Ilmastointikoneen asennustapa

5.3.1 Tilakohtaisen ilmastointikoneen asennustapa

Tilakohtainen ilmastointikone voi tarjota yksinkertaisen ja nopean asennettavuutensa ansiosta ratkaisun kohteisiin, jossa on nopeasti korjausta vaativia ongelmia sisäilmaston laadun kanssa. Kaappimallinen ilmastointikone vaatii lattialta sopivan sijoituspaikan palvelemissaan tilassa, jotta ilma saadaan jaettua oleskeluvyöhykkeelle mahdollisimman tasaisesti aiheuttamatta kuitenkaan vedon tunnetta. Käytännössä sopiva sijoituspaikka on seinustalla lähellä paikkaa, josta raitis- ja jäteilma viedään ulos, jotta vältetään turhan pitkältä kanavoinnilta.

Tilakohtainen ilmastointikone ei vaadi palvelemaansa tilaan rakenteellisia muutoksia lukuun ottamatta läpivientejä raitis- ja jäteilmakanaville. Käytännössä läpiviennit on helpointa tehdä esimerkiksi korvaamalla tuuletusikkuna lämmöneristetyllä levyllä ja tehdä siihen läpiviennit raitis- ja jäteilmakanaville. Tällöin on kuitenkin varmistuttava, että raitisilman sisäänoton lähistöllä ei esimerkiksi tupakoida.

Jos rakennukseen päätetään tehdä perusparannus, jossa myös ilmanvaihtojärjestelmä uusitaan, voidaan tilakohtaiset ilmanvaihtokoneet siirtää suhteellisen vaivattomasti mahdolliseen seuraavaan kohteeseen, jonka ilmanvaihto vaatii parannusta. Joskus saatetaan kuitenkin tulla vastaan tilanne, jossa keskitetyn ilmanvaihtojärjestelmän asentaminen ei ole mahdollista johtuen esimerkiksi rakenteellisista seikoista tai tilanpuutteesta. Tällöin tilakohtaiset ilmanvaihtokoneet saattaisivat olla jopa lopullinen ilmanvaihdon ratkaisu kohteessa.

5.3.2 Rakentamismääräykset koskien raitis- ja jäteilman seinäpuhallusta

Rakentamismääräyskokoelman D2 määräyksen mukaan jäteilma on johdettava ulos siten, ettei rakennukselle, sen käyttäjille tai ympäristölle aiheudu terveydellistä tai muuta haittaa. Ulkoilmasta puolestaan on annettu määräys, jonka mukaan ulkoilmalaitteet on

sijoitettava siten, että rakennukseen tuleva ulkoilma on mahdollisimman puhdasta. Ulkoilmaa ei myöskään saa ottaa ilmanlaatua heikentävän rakenteen tai rakennusosan kautta. [1]

Määräyksissä ei siis kielletä jäteilman puhaltamista seinästä, vaikka tavanomaisempi tapaa onkin käytännössä puhaltaa jäteilma katolta ylöspäin. Koululuokan jäteilma on poistoilmaluokan I ilmaa, mikä tarkoittaa sitä, että se sisältää vain vähän epäpuhtauksia ja ne ovat pääasiallisesti lähtöisin ihmisistä tai rakenteista. Tämän poistoilmaluokan ilmaa saa myös käyttää palautus- ja siirtoilmana, joten tilakohtaisen ilmastointikoneen raitis- ja jäteilmakanavointi seinästä on rakentamismääräysten mukaista [1].

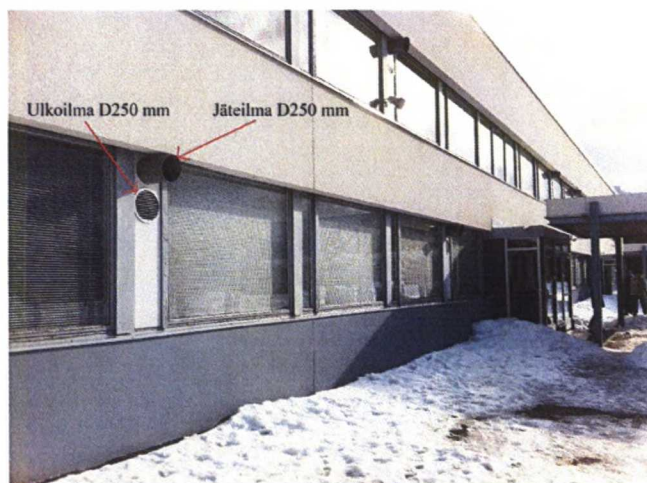
On tosin huomioitava, että rakentamismääräyskokoelman D2 ohjeessa mainitaan seinäpuhalluksessa vähimmäisetäisyydeksi ulko- ja jäteilmalaitteiden välillä 1,5 metriä ja jäteilman ulospuhallusnopeudeksi vähintään 5 m/s [1]. Nämä ohjeiden mukaiset etäisyysvaatimukset ovat käytännössä vaikeita toteuttaa kohteessa, jossa ilmastointikone asennetaan luokkatilaan. Lisäksi ilman nopeusvaatimus ei täyty edes käytettäessä ilmastointikoneen suurinta ilmavirtaa 230 dm³/s halkaisijaltaan 250 mm ilmastointikanavassa. Rakennusvalvonnan suhtautuminen seinäpuhallukseen on ollut varauksellista.

6 MITTAUKSET TUTKIMUSKOHTEN KOULULUOKISSA

6.1 Mittauskohteen esittely

Mittauskohteina oli kaksi vierekkäistä ala-asteen 3. luokkaa vuonna 1965 valmistuneessa koulurakennuksessa. Luokassa 4 oli 22 oppilasta ja opettaja, luokassa 5 puolestaan 16 oppilasta ja opettaja. Kummassakin luokassa oli ennen koneellinen poistoilmanvaihto. Poistoilmaventtiilejä (halkaisijaltaan 160 mm) oli kaksi kappaletta kummassakin luokassa ja ne sijaitsivat ikkunaseinän vastakkaisella seinällä. Kappaleen 3.3.1 kuvassa 1 on esitetty luokkien 4 ja 5 sijainti koulun pohjapiirustuksessa. Poistoilmaventtiilien sijainti on merkitty kuvaan kirjaimilla A ja B. Korvausilma tuotiin luokkiin sisään ikkunakarmien yläpuolella sijaitsevista korvausilma-aukoista.

Kummankin luokan pinta-ala oli 63 m² ja korkeus keskimäärin 3 metriä. Luokkien tilavuudet olivat noin 189 m³. Luokkien ulkoseinät avautuivat itään. Kummankin luokan lämmitys oli toteutettu vesikiertoisilla radiaattoreilla. Tilakohtaiset ilmastointikoneet sijoitettiin luokkiin ulkoseinän viereen luokan takaosaan. Raitis- ja jäteilma vietiin ulos tuuletusikkunan tilalle asennettuun levyyn tehtyjen läpivientien kautta. Jäteilmapuhallus ja raitisilman sisäänotto tapahtui siis talon seinustalta siten, että jäteilman ulospuhallus sijaitsi raitisilmasäleikön yläpuolella. Kuvassa 8 on esitetty raitis- ja jäteilmakanavoinnin sijoittelu ulkoapäin katsottuna.



Kuva 8. Raitis- ja jäteilmakanavointi ulkoapäin katsottuna

6.2 Mittausten tavoitteet

Mittauksia tehtiin kahdessa luokassa. Kummassakin luokassa oli tavoitteena selvittää sisäilmasto-olosuhteet eri ilmanvaihtojärjestelmillä. Tämä tarkoitti sisäilmasto-olosuhteiden mittaamista koneellisen poiston käydessä puoliteholla ja täydellä teholla, sekä tilakohtaisen ilmastointikoneen ollessa käytössä. Ilmamäärät eri ilmanvaihtojärjestelmien välillä eivät olleet yhtä suuria. Tavoitteena ei kuitenkaan ollut verrata koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän ja koneellisen tulo-poistojärjestelmän aikaansaamia sisäilmasto-olosuhteita yhtä suurilla ilmamäärillä, vaan tutkia, millaiset olosuhteet luokassa vallitsivat ennen tilakohtaisen ilmastointikoneen asentamista ja sen jälkeen.

Ilman lämpötilaolosuhteiden ja laadun lisäksi selvitettiin paine-ero kummankin luokan ja ulkoilman välillä, sillä koneellisen poiston aiheuttama suuri alipaine oli aiheuttanut hallitsematonta ilman kulkeutumista luokkaan. Tavoitteena oli selvittää, muuttaako tilakohtaisen ilmanvaihtokoneen lisääminen painesuhteita luokkatilan ja ulkoilman välillä.

Lisäksi toisessa luokassa (luokka 4) oli tavoitteena selvittää tarkemmin tilakohtaisen ilmastointikoneen soveltumista koululuokan ilmanvaihdon ratkaisuksi. Mittausten tavoite oli selvittää, voidaanko syrjäyttävällä ilmanjaolla toteutetulla tilakohtaisella ilmastointikoneella aikaansaada vähintään määräysten mukaiset sisäilmasto-olosuhteet koululuokassa. Lämpötilan ja epäpuhtauksien kerrostumista tutkittiin, kuten myös ilman nopeuksia tuloilmalaitteen läheisyydessä, jotta voitiin selvittää vetoriski.

6.3 Mittausmenetelmät

6.3.1 Mittalaitteet

Mittauksissa käytettiin sisä- ja ulkolämpötilan sekä suhteellisen kosteuden määrittämiseen Testo 174H –mittaria, joka myös tallensi mittaustiedot. Mittausvälinä käytettiin 5 tai 10 minuuttia riippuen mittauksesta. Lämpötilamittauksen osalta mittarin mittausalue on $-20...+70\text{ °C}$, tarkkuus $\pm 0,5\text{ °C}$ koko mittausalueella ja lukematarkkuus $0,1\text{ °C}$. Kosteusmittauksen osalta mittausalue on $0-100\text{ \% RH}$, tarkkuus $\pm 3\text{ \%}$ mittausalueella $2-98\text{ \% RH}$ ja lukematarkkuus $0,1\text{ \% RH}$. [37]

Paine-eron mittaamiseen rakennuksen ulkovaipan yli käytettiin Tinytag Plus – dataloggeria, Dwyer paine-eromittaria ja läpivientiputkea. Paine-eromittarin tarkkuus on $\pm 1 \%$. Mittausväli oli 5 minuuttia. [38]

Hiilidioksidipitoisuuden mittaamiseen käytettiin Tinytag Plus – dataloggeria sekä Sense Air –CO₂ mittaria. Mittausalue on 0-2000 ppm ja tarkkuus $\pm 1 \%$ mittausalueesta ja $\pm 5 \%$ mittausarvosta. Mittausväli oli 5 minuuttia. [39]

Ilmavirrat luokkatilojen poistoilmaventtiileistä mitattiin käyttäen Swema 3000 –mittaria sekä SwemaFlow 125 –balometriä. Balometrissä on kuumalankaverkko, jonka avulla saatiin keskiarvo mittausaukon läpi kulkevan ilmavirran nopeudesta. Balometrin mitta-alue on 2-125 dm³/s ja tarkkuus $\pm 10 \%$ käytettäessä Back Pressure –mittausmenetelmää, jossa mitataan ilmavirta kuristusrenkaan kanssa sekä ilman rengasta, jolloin lopullisessa tuloksessa on huomioitu balometrin aiheuttama painehäviö. [40]

Ilman nopeusmittaukset suoritettiin käyttäen Swema 3000 –mittaria sekä SWA03 –suuntariippumatonta nopeusmittaria. Nopeusmittarin mitta-alue on 0,05-3 m/s, vaste-aika 0,2 s ja näytteenottotiheys 0,1 s. Mittausvirhe on 10-34 °C lämpötiloilla $\pm 0,04$ m/s alle 1 m/s nopeuksilla ja $\pm 4 \%$ mittarin lukemasta yli 1 m/s nopeuksilla. [41]

Äänitasomittaukset suoritettiin Brüel & Kjaer 2260 mittarilla, jonka mitta-alue A-painotettuna on 24-150 dB ja nimellinen herkkyys $\pm 1,5$ dB. [42]

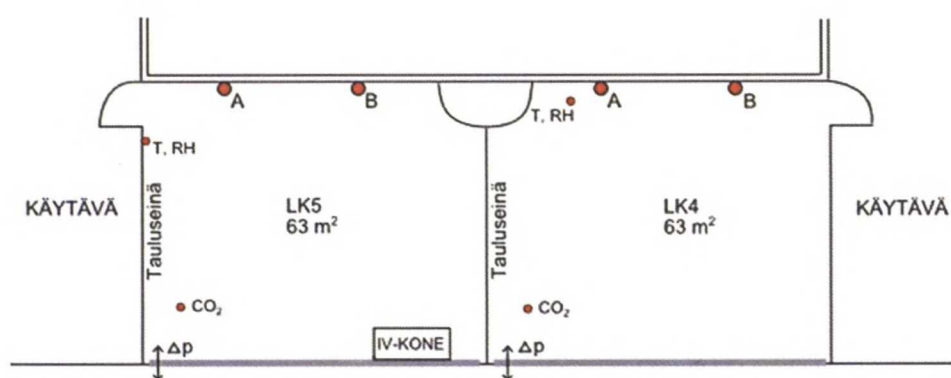
Tilakohtaiseen ilmastointikoneeseen asennettiin muistikortti, jolle tallennettiin tulo- ja poistoilmamäärät, lämmöntalteenoton hyötysuhde, tuloilman lämpötila, poistoilman lämpötila, ulkoilman lämpötila, puhaltimien SFP-luku ja CAC-anturin mittaustulos 5 minuutin välein.

6.3.2 Luokan 4 perusmittaukset

Luokassa 4 suoritettiin yhteensä kuusi yhden viikon pituista seurantamittausta, joissa mitattiin sisäilman olosuhteita eri tilanteissa. Näistä mittauksista kaksi oli perusmittauksia, joissa mitattiin luokan olosuhteita ennen tilakohtaisen ilmastointikoneen asentamista ja neljässä mittauksessa tutkittiin tarkemmin olosuhteita sekä ilmastointikoneen ollessa käytössä että koneellisen poiston käydessä täydellä teholla. Luokassa suoritettavien

mittausten lisäksi ulos sisäpihan porttikongiin sijoitettiin ulkoilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittaava mittari.

Kahdessa viikon pituisessa perusmittauksessa mitattiin hiilidioksidipitoisuutta, lämpötilaa, kosteutta ja paine-eroa ulkovaipan yli koneellisen poistojärjestelmän käydessä yhden viikon puolella teholla sekä yhden viikon täydellä teholla. Seurantamittausten yhteydessä mitattiin poistoilmavirta kummastakin luokan poistoilmaventtiilistä. Mittauspisteet on esitetty kuvassa 9, pisteet A ja B ilmaisevat poistoilmaventtiilien (KSO-160) sijainnin luokassa.



Kuva 9. Mittauspisteet luokan 4 ja 5 perusmittauksissa.

Hiilidioksidimittari sijoitettiin 1,1 metrin korkeuteen luokan etuosassa sijaitsevan tietokonepöydän päälle, lämpötila- ja kosteusmittari 1,1 metrin korkeuteen luokassa sijaitsevan kaapin kylkeen. Paine-eromittari sijoitettiin luokan etuosassa sijaitsevan tuuletusikkunan läpi. Läpivientiputki vietiin tuuletusikkunan kohdalta ulos. Mittari mittasi paineeron ulkoilmassa ja luokkatilassa vallitsevan ilmanpaineen välillä.

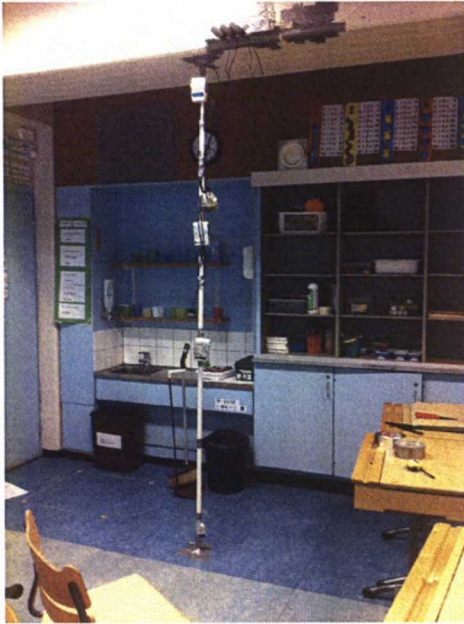
6.3.3 Luokan 4 syventävät mittaukset

Luokassa 4 suoritettiin kahden viikon perusmittausten lisäksi neljä viikon pituista syventävää seurantamittausta, joiden tavoitteena oli tutkia tarkemmin luokassa vallitsevia sisäilmasto-olosuhteita eri tilanteissa.

Syventävissä mittauksissa tutkittiin neljää eri tilannetta:

- Tilakohtainen ilmastointikone tarpeenmukaisella ohjauksella, ison ilmavirran asetusarvo 180 dm³/s

- Tilakohtainen ilmastointikone tarpeenmukaisella ohjauksella, ison ilmavirran asetusarvo $200 \text{ dm}^3/\text{s}$
- Tilakohtainen ilmastointikone vakioilmavirralla $140 \text{ dm}^3/\text{s}$
- Koneellinen poistoilmanvaihto täydellä teholla, poistoilmavirta $52,2 \text{ dm}^3/\text{s}$



Kuva 10. Mittaustanko mittareineen luokassa 4

Syventävissä mittauksissa luokkaan 4 sijoitettiin mittaustanko, johon kiinnitettiin hiilidioksidi-, lämpötila- ja kosteusmittareita eri korkeuksille lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden kerrostumisen mittaamista varten. Mittaustanko mittareineen on esitetty kuvassa 10 ja mittareiden korkeudet taulukossa 7. Paine-ero luokan ja ulkoilman välillä mitattiin kuten perusmittauksissa sijoittamalla paine-eromittaus luokan etuosassa sijaitsevan tuuletusikkunan läpi. Ulkoilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mitattiin kaikkien seurantomittausjaksojen aikana sisäpihan porttikongiin sijoitetun mittarin avulla.

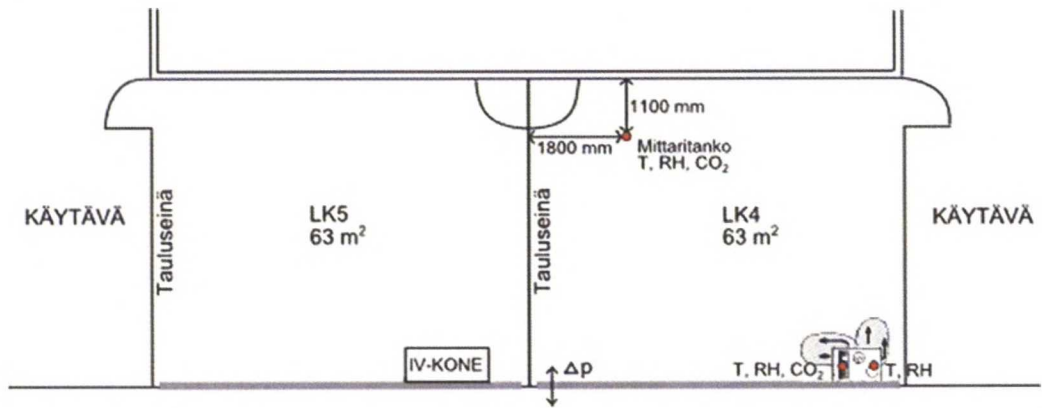
Taulukossa 7 esitetyt mittareiden asennuskorkeudet valittiin SFS 5511-standardin mukaisesti lämpötilan kerrostumisen mittaamista varten [43]. Lisäksi asetettiin yksi mittauspiste mahdollisimman lähelle katon rajaa 2,4 m korkeuteen. Kuvassa 11 on esitetty lattiasta kattoon kulkevaan palkkiin jännitetyn mittaritangon sijainti. Palkin alapinta sijaitsi 2,5 metrin korkeudessa katon korkeuden ollessa 3 metriä.

Taulukko 7. Mittareiden asennuskorkeudet luokan 4 syventävissä mittauksissa

Korkeus lattiasta (m)	Lämpötila- ja kosteusmittari	Hiilidioksidimittari
0,1	X	
1,1	X	X
1,7	X	X
2,4	X	X

Mittauksissa, joissa tutkittiin tilakohtaisen ilmastointikoneen aikaansaamia olosuhteita, asennettiin ilmastointikoneeseen poisto- ja tuloilmakammioon lämpötila- ja kosteusmittarit sekä ilmastointikoneen poistoilma-aukkoon hiilidioksidimittari. Tämän lisäksi ilmastointikoneeseen asennettiin muistikortti, jolle tallentui muun muassa ilmastointikoneen tulo- ja poistoilmamäärät, tulo- ja poistoilman lämpötila, ulkoilman lämpötila, lämmöntalteenoton hyötysuhde, tarpeenmukaisen ohjauksen CAC-anturin mittaustulos ja puhaltimien SFP-luku.

Ilmastointikone sijaitsi luokassa 4 ikkunaseinällä takaseinän lähellä. Tästä syystä tuloilman puhalluskuvio asetettiin kuvan 11 mukaisesti puhaltamaan luokan takaseinän ja ikkunaseinän suuntaisesti, jotta oleskelualueelle ei aiheutuisi vetoa lähivyöhykkeen alueella.

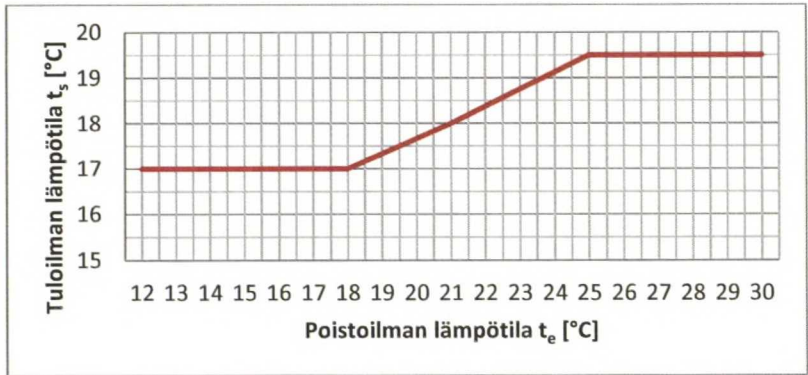


Kuva 11. Mittauspisteet ja puhalluskuvio jatkomittauksissa

Syventävien mittausten osiossa, jossa mitattiin luokan olosuhteita ilmastointikoneen ollessa tarpeenmukaisella ohjauksella, asetettiin ensimmäisellä mittausviikolla isoksi ilmamääräksi 180 dm³/s ja toisella viikolla 200 dm³/s. Minimi-ilmamäärän asetusarvo oli 80 dm³/s kummallakin viikolla. Tuloilman lämpötila asetettiin riippumaan poistoilman lämpötilasta seuraavasti:

- kun $t_e \leq 18\text{ °C}$, $t_s = 17\text{ °C}$
- kun $t_e = 21\text{ °C}$, $t_s = 18\text{ °C}$
- kun $t_e \geq 25\text{ °C}$, $t_s = 19,5\text{ °C}$

Tavoitteena yllä esitetyllä tuloilman lämpötilan säädöllä oli pitää tuloilman lämpötila normaaleilla sisälämpötiloilla (20-22 °C) noin 3 °C sisälämpötilaa alhaisempana kuitenkin niin, että alhaisilla sisälämpötiloilla tuloilman lämpötila ei ole liian alhainen. Tällä pyrittiin vähentämään mahdollista vedon tunnetta ilmastointikoneen lähistöllä. Korkeilla sisäilman lämpötiloilla tuloilman lämpötila sai olla yli 3 °C alilämpöinen, jotta luokasta saataisiin poistettua ilmastoinnin avulla ylikuumuutta. Kuvassa 12 on esitetty tuloilman asetusarvon riippuvuus poistoilman lämpötilasta eri lämpötiloilla.



Kuva 12. Tuloilman lämpötilan asetusarvo poistoilman lämpötilan mukaan syventävien mittausten tarpeenmukaista ilmanvaihtoa tutkittaessa

Syventävien mittausten osiossa, jossa ilmastointikone oli asetettu vakioilmavirralle 140 dm³/s, tuloilman lämpötila pidettiin vakiona 18 °C:ssa.

Maanantaista perjantaihin ilmastointikone oli käynnissä klo 07-16 välisenä aikana ja viikonloppuisin kone ei käynyt. Tämä aikaohjelma oli käytössä sekä tarpeenmukaisen ohjauksen mittauksissa että vakioilmavirtaohjauksen mittauksissa. Lämmöntalteenotolle

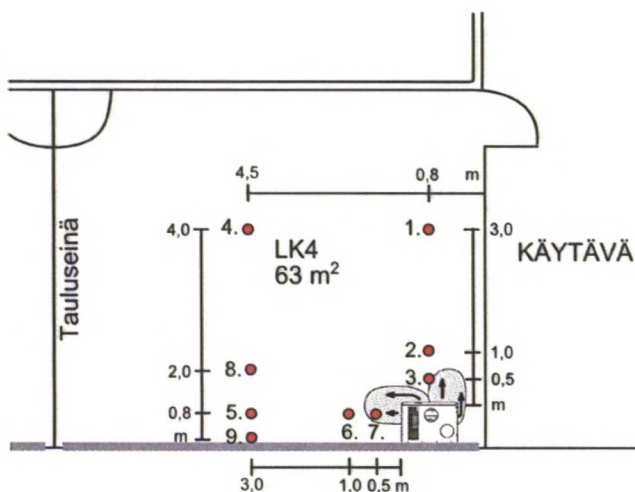
ei asetettu lämpötilarajaa jäätymisenestolle, eikä tulopuhallinta asetettu pienentämään ilmavirtaa ulkoilman lämpötilan laskiessa jonkin arvon alapuolelle. Tarpeenmukaisessa ohjauksessa CAC-anturin asetusarvoksi pienellä ilmavirralla asetettiin 40 % ja isolla ilmavirralla 30 %. Valmistajan käyrän mukaan nämä vastaavat hiilidioksidipitoisuuksia 1100 ppm ja 900 ppm [36].

Yhdessä viikon pituisessa seurantamittauksessa mitattiin tarkemmin luokan olosuhteita koneellisen poiston käydessä täydellä teholla. Tässä mittauksessa toiseen poistoilmakanavaan (venttiililtä A lähtevä kanava) asetettiin hiilidioksidi-, lämpötila- ja kosteusmittarit. Lämpötilan ja hiilidioksidin kerrostumista mitattiin mittaritangon mittareilla kuten ilmastointikoneen mittauksissakin, samoin luokan ja ulkoilman välistä paine-eroa.

Luokasta 4 mitattiin myös ilman nopeus ja keskilämpötila ilmastointikoneen käydessä 140 dm³/s ja 200 dm³/s vakioilmavirroilla sekä koneellisen poiston käydessä täydellä teholla poistoilmavirran ollessa tällöin 52,2 dm³/s. Ilman nopeusmittauksista tallentui ilman keskinopeus mittauspisteessä 3 minuutin ajalta, sekä suurin ja pienin ilman nopeus ja keskihajonta. Samalla mitattiin luokan pintojen lämpötila keskimääräisen säteilylämpötilan selvittämiseksi.

Ilmastointikoneen luokkaan aiheuttamia ilman virtausnopeuksia mitattaessa luokassa tehtiin ensin savukoe, jolla visualisoitiin ilman jakautumista luokassa ja kartoitettiin riskialttiimmat paikat vedon suhteen. Ilman nopeudet mitattiin mittauspisteistä 1-7 ja ne sijaitsivat 5 cm korkeudella lattiasta. Mittauspisteet on esitetty kuvassa 13.

Ilman nopeudet koneellisen poiston käydessä täydellä teholla mitattiin savukokeen jälkeen oleskelualueelta, sekä savukokeen perusteella suurimman vetoriskin omaavista pisteistä. Ilman nopeudet mitattiin pisteistä 4, 5, 8 ja 9 siten, että pisteen 4 mittauskorkeus oli 1,1 m, pisteen 5 mittauskorkeudet olivat 1,1 ja 1,7 m sekä pisteissä 8 ja 9 mittauskorkeus oli 1,7 m. Mittauspisteet on esitetty kuvassa 13. Myös luokan pintojen lämpötilat mitattiin keskimääräisen säteilylämpötilan selvittämiseksi.



Kuva 13. Ilman nopeusmittauspisteet ilmastointikoneen ja koneellisen poiston tapauksissa

Luokassa 4 mitattiin myös ilmastointikoneen aiheuttama äänitaso luokassa koneen käydessä $200 \text{ dm}^3/\text{s}$ ja $140 \text{ dm}^3/\text{s}$ ilmavirroilla sekä silloin, kun kone ei ollut käynnissä. Äänitaso mitattiin 1 minuutin pituisena mittauksena, josta tuloksena saatiin A-painotettu keskimääräinen äänitaso. Äänenpainetaso mitattiin 1,3 metrin korkeudelta kuvassa 13 esitetyistä mittauspisteistä 1 ja 4.

6.3.4 Luokan 5 mittaukset

Luokassa 5 suoritettiin kolme viikon pituista seurantamittausta, joissa kaikissa mitattiin luokan lämpötilaa ja suhteellista kosteutta, hiilidioksidipitoisuutta sekä paine-ero luokan 5 ulkoseinän yli. Mittaukset suoritettiin seuraavissa tilanteissa:

- Tilakohtainen ilmastointikone tarpeenmukaisella ohjauksella, ison ilmavirran asetusarvo $160 \text{ dm}^3/\text{s}$
- koneellinen poistoilmanvaihto puoliteholla, poistoilmavirta $33,3 \text{ dm}^3/\text{s}$
- koneellinen poistoilmanvaihto täydellä teholla, poistoilmavirta $67,8 \text{ dm}^3/\text{s}$

Kuvassa 10 on esitetty luokan 5 mittauksien mittareiden sijoittelu. Kuvassa tunnuksilla A ja B on esitetty poistoilmaventtiilien (KSO-160) sijainti. Hiilidioksidimittari sijoitettiin 1,1 metrin korkeuteen luokan tietokonepöydän päälle. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittari sijoitettiin liitutaulun viereen 1,1 metrin korkeuteen ja paine-eromittari luokan etuosassa sijaitsevan tuuletusikkunan viereen ja läpivientiputki vietiin

tuuletusikkunan välistä ulkoilmaan. Lisäksi ilmastointikoneeseen laitettiin muistikortti, joka tallensi ilmastointikoneen tiedot 5 minuutin välein.

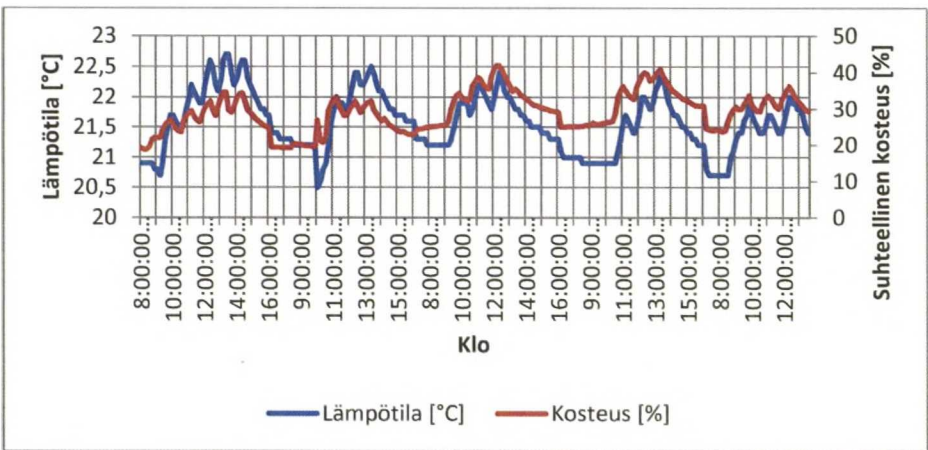
Ilmastointikoneen aikaansaamia sisäolosuhteita mitattaessa tuloilman lämpötilasäätö toteutettiin siten, että ilmastointikone pyrki pitämään tuloilman jatkuvasti 2 °C poistoilman lämpötilaa alhaisempana. Tämä on tehdasasetus lämpötilasäädölle. Tulo- ja poistoilmavirrat asetettiin yhtä suuriksi ja tarpeenmukaisen ohjauksen asetusarvoksi CAC-anturille asetettiin pienellä ilmavirralla 40 % ja isolla ilmavirralla 30 %, jotka vastaavat valmistajan käyrän mukaan 1100 ppm ja 900 ppm hiilidioksidipitoisuuksia [36]. Ilmastointikoneen käyntiaika oli maanantaista perjantaihin klo 7-16, viikonloppuisin kone ei ollut käynnissä.

6.4 Mittaustulokset

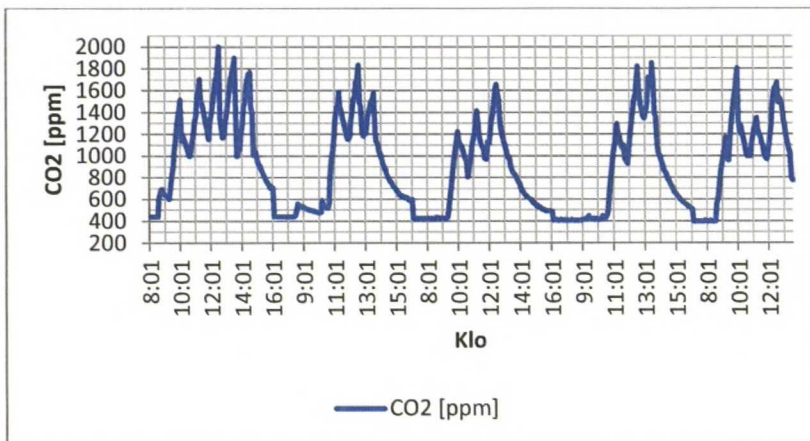
6.4.1 Luokka 4: Koneellinen poistoilmanvaihto puolella teholla

Luokan 4 ilmamäärä venttiilistä A oli 11,7 dm³/s ja venttiilistä B 12,7 dm³/s. Yhteensä luokan 4 poistoilmavirta oli siis noin 24,4 dm³/s.

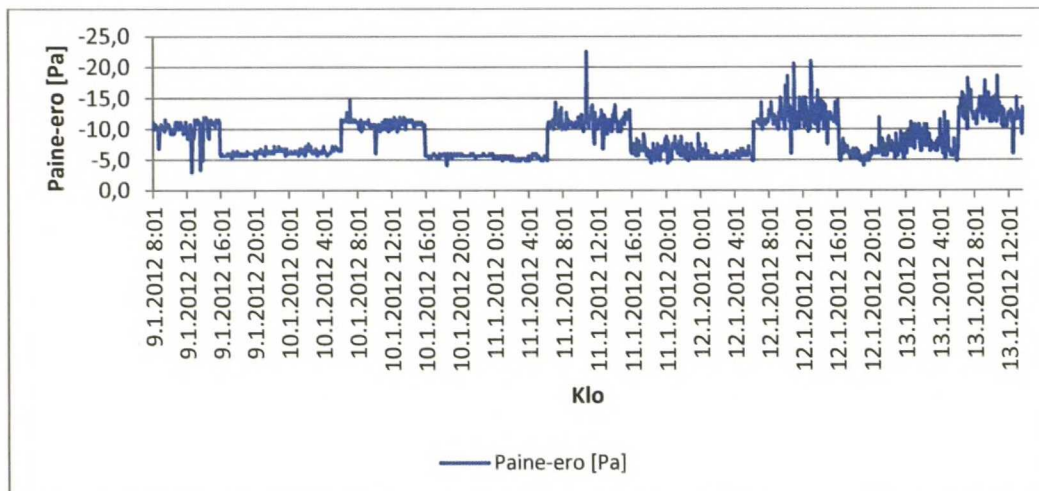
Kuvassa 14 on esitetty luokan 4 lämpötila ja suhteellinen kosteus koulupäivien aikana klo 08-16 maanantaista perjantaihin 9.-13.1.2012. Luokan 4 hiilidioksidipitoisuus samalla ajanjaksolla on esitetty kuvassa 15 ja luokan 4 paine-ero ulkoilmaan nähten kuvassa 16.



Kuva 14. Luokan 4 lämpötila ja suhteellinen kosteus koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä puoliteholla 9.-13.1.2012



Kuva 15. Luokan 4 CO₂-pitoisuus kouluviikon aikana koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä puoliteholla 9.-13.1.2012

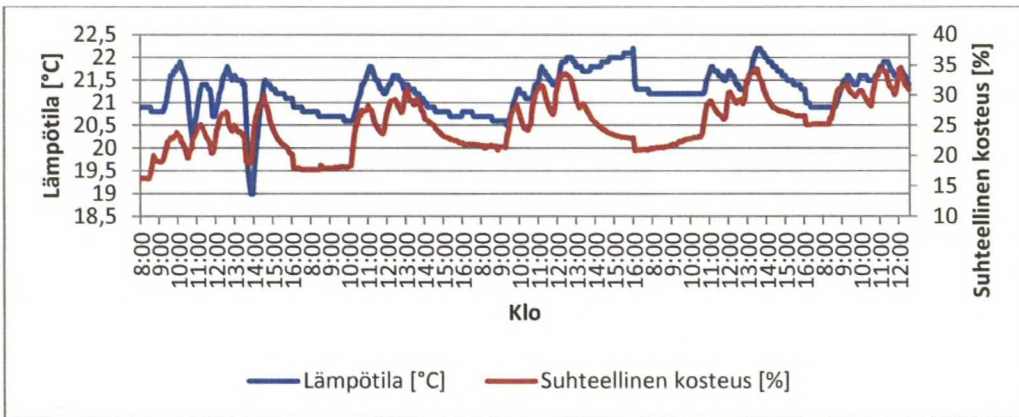


Kuva 16. Paine-ero luokan 4 ulkovaipan yli koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä puoliteholla 9.-13.1.2012

6.4.2 Luokka 4: Koneellinen poistoilmanvaihto täydellä teholla

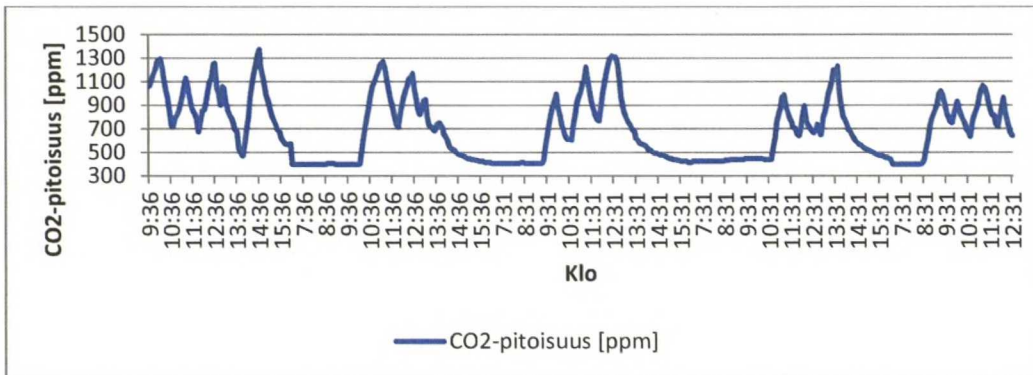
Poistoilmapuhaltimen käydessä täydellä teholla luokan 4 poistoilmamäärä venttiilistä A oli 27,4 dm³/s ja venttiilistä B 25,6 dm³/s. Yhteensä poistoilmavirta oli siis 53,0 dm³/s.

Luokan 4 lämpötila ja suhteellinen kosteus viikolla 9 on esitetty kuvassa 17.

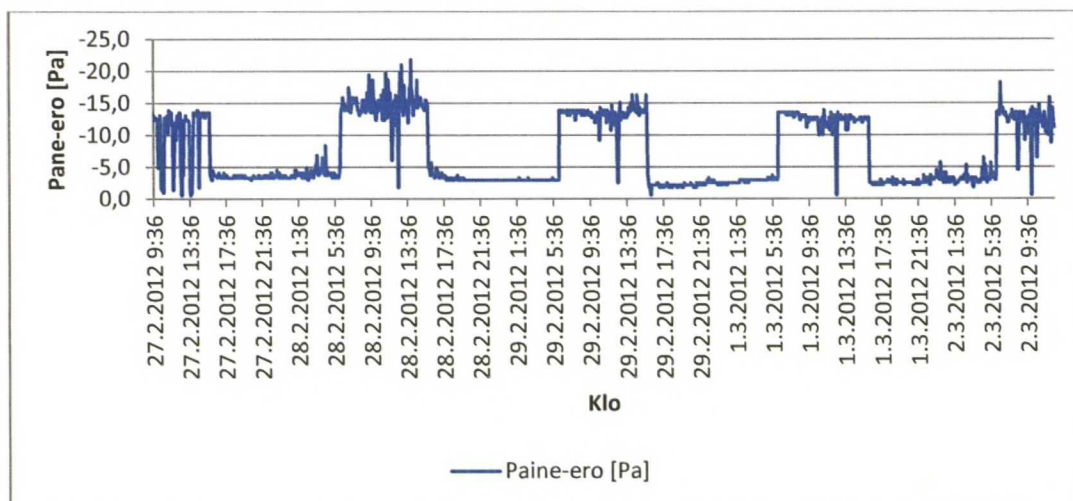


Kuva 17. Luokan 4 lämpötila ja suhteellinen kosteus koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä täydellä teholla 27.2-2.3.2012

Hiilidioksidipitoisuus luokassa 4 ajanjaksolla 27.2.-2.3.2012 on esitetty kuvassa 18 ja paine-ero luokahuoneen ja ulkoilman välillä kuvassa 19.



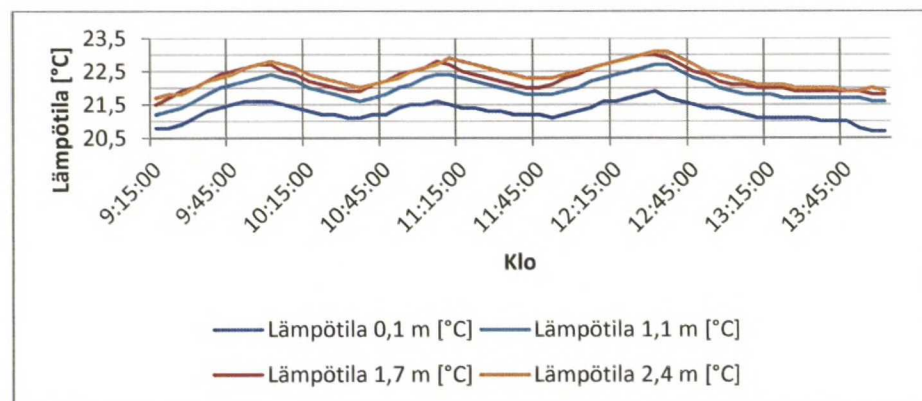
Kuva 18. Luokan 4 hiilidioksidipitoisuus koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä täydellä teholla 27.2-2.3.2012



Kuva 19. Luokan 4 paine-ero ulkovaipan yli koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä täydellä teholla 27.2-2.3.2012

23.-27.4.2012 koneellinen poistoilmanvaihto oli luokassa 4 täydellä teholla. Luokassa oli mittaustanko, johon oli sijoitettu lämpötila-, kosteus- ja hiilidioksidimittareita eri korkeuksille. Poistoilmavirraksi mitattiin venttiilistä A 24,7 dm³/s ja venttiilistä B 27,5 dm³/s poistoilmavirran ollen yhteensä siis 52,2 dm³/s.

Lämpötilat eri korkeuksilla 25.4. on esitetty kuvassa 20. Lämpötilat viikolla 17 eri korkeuksilla on esitetty taulukossa 8. Taulukossa on esitetty lämpötilan keskiarvo oppituntien aikana sekä lämpötilan minimi- ja maksimiarvot. Taulukossa 9 puolestaan on esitetty suhteellisen kosteuden keskiarvot, maksimiarvot ja minimiarvot eri korkeuksilla viikolla 17.



Kuva 20. Luokka 4 lämpötilat eri korkeuksilla 25.4. koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä täydellä teholla

Taulukko 8. Lämpötilat eri korkeuksilla 23.-27.4.2012

Oppituntien aikana vk 17 (ei 26.4.)	0,1 m	1,1 m	1,7 m	2,4 m
Ilman lämpötilan keskiarvo [°C]	21,1	21,7	22,0	22,1
Minimi [°C]	20,1	20,6	20,8	20,9
Maksimi [°C]	22,2	23,2	23,7	23,6

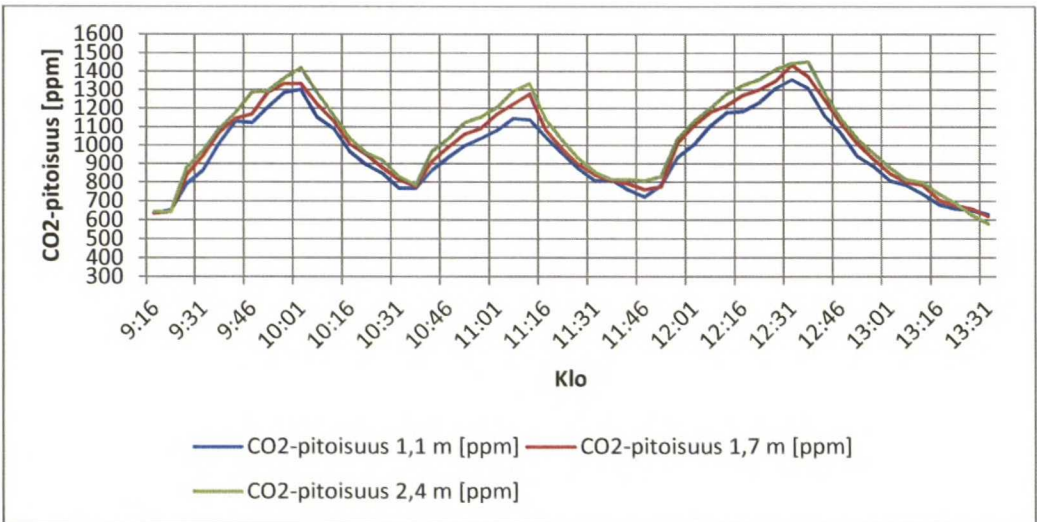
Taulukko 9. Suhteellinen kosteus eri korkeuksilla 23.-27.4.2012

Oppituntien aikana vk 17 (ei 26.4.)	0,1 m	1,1 m	1,7 m	2,4 m
Suhteellinen kosteus keskiarvo [%]	39,7	38,7	39,1	37,2
Minimiarvo [%]	34,0	33	32,9	31,1
Maksimiarvo [%]	47,6	46	46,1	44,7

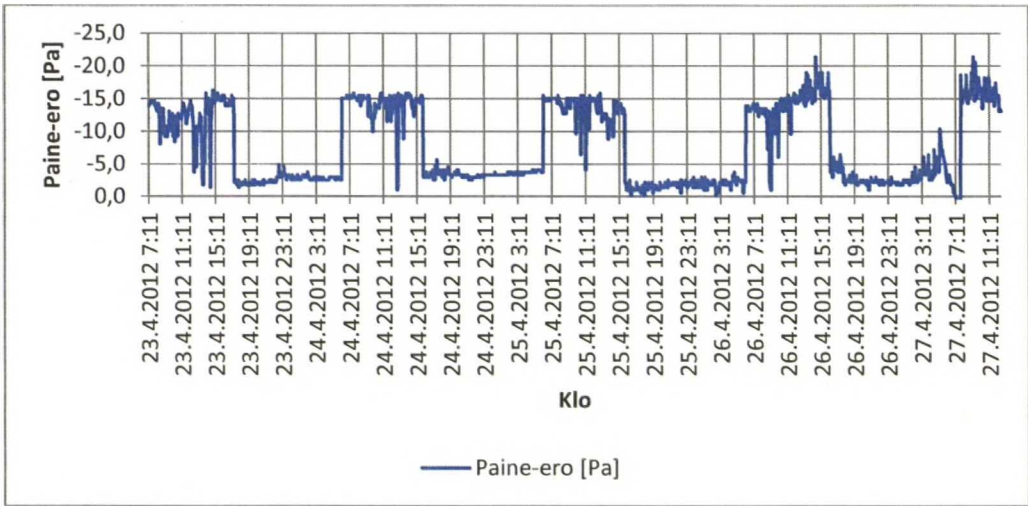
Luokan 4 hiilidioksidipitoisuuden keskiarvo ja maksimiarvo eri korkeuksilla on esitetty taulukossa 10. Kuvassa 21 on esitetty hiilidioksidipitoisuus eri korkeuksilla yhden koulupäivän aikana ja kuvassa 22 luokan paine-ero ulkoilmaan nähden 23.-27.4.2012.

Taulukko 10. Hiilidioksidipitoisuus eri korkeuksilla 23.-27.4.2012

Oppituntien aikana vk 17 (ei 26.4.)	1,1 m	1,7 m	2,4 m
Hiilidioksidipitoisuuden keskiarvo [ppm]	949	998	1021
Maksimi [ppm]	1365	1482	1490



Kuva 21. Luokan 4 hiilidioksidipitoisuus eri korkeuksilla 25.4.2012 koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä täydellä teholla



Kuva 22. Luokan 4 paine-ero ulkoilmaan nähden koneellisen poistoilmanvaihdon käydessä täydellä teholla 23.-27.4.2012

Taulukossa 11 on esitetty 26.4. luokassa 4 suoritettujen ilman nopeusmittauksien tulokset. Ilman nopeudet mitattiin savukokeen avulla selvitetystä suurimman vektoriskin omaavista pisteistä. Otsikkosarakkeessa on ilmoitettu mittauspiste sekä korkeus, jolta ilman nopeus on mitattu. Mittauspisteiden sijainti luokassa on esitetty kuvassa 13 (s.58).

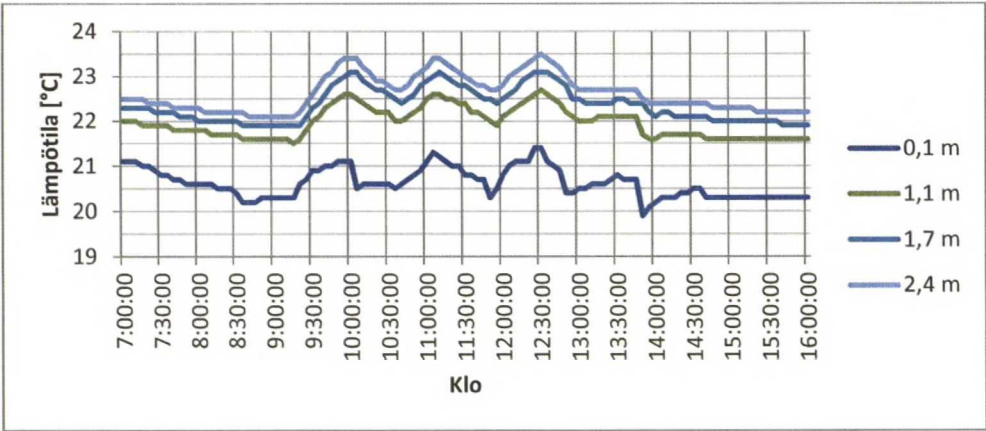
Taulukko 11. Ilman nopeudet 26.4.2012 koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä täydellä teholla

Mittauspiste	4: 1,1 m	5: 1,1 m	5: 1,7 m	8: 1,7 m	9: 1,7 m
Keskiarvo [m/s]	0,028	0,031	0,055	0,019	0,071
Maksimi [m/s]	0,092	0,163	0,199	0,1	0,241
Minimi [m/s]	0	0	0	0	0
Keskihajonta [m/s]	0,016	0,02	0,035	0,016	0,042
Keskilämpötila [°C]	20,6	19,7	20,2	20,4	20,5
Vetoriski DR [%]	0	0	2,3	0	5,8

6.4.3 Luokka 4: Tilakohtainen ilmastointikone tarpeenmukaisella ohjauksella

Viikolla 6 (6.-10.2) ja viikolla 7 (13.-17.2.) luokassa 4 oli tilakohtainen ilmastointikone käynnissä tarpeenmukaisella ohjauksella. Viikolla 6 ilmastointikoneen isoksi ilmamääräksi oli asetettu 180 dm³/s ja viikolla 7 se oli 200 dm³/s.

Luokan 4 lämpötilat mitattiin oleskelualueelta kolmelta eri korkeudelta: 0,1 m, 1,1 m, 1,7 m ja 2,4 m. Kuvassa 23 on esitetty lämpötilat eri korkeuksilla 13.2.



Kuva 23. Luokan 4 lämpötilat eri korkeuksilla 13.2.2012

Taulukossa 12 on esitetty luokan 4 lämpötilojen keskiarvot sekä minimi- ja maksimi-arvot eri korkeuksilla viikoilla 6 ja 7.

Taulukko 12. Luokan 4 lämpötilojen keskiarvot sekä minimi- ja maksimi-arvot eri korkeuksilla viikoilla 6 (6.-10.2) ja 7 (13.-17.2.)

Oppituntien aikana vk 6	0,1 m	1,1 m	1,7 m	2,4 m
Ilman lämpötilan keskiarvo [°C]	20,1	21,6	22,1	22,5
Minimi [°C]	17,4	19,9	20,4	20,7
Maksimi [°C]	21,8	23,4	23,9	24,2
Oppituntien aikana vk 7				
Ilman lämpötilan keskiarvo [°C]	20,4	21,8	22,3	22,6
Minimi [°C]	19,2	20,9	21,4	21,6
Maksimi [°C]	21,4	22,7	23,1	23,5

Taulukossa 13 on esitetty keskimääräiset suhteelliset kosteudet koulupäivien aikana eri korkeuksilla viikoilla 6 ja 7.

Taulukko 13. Luokan 4 keskimääräiset suhteelliset kosteudet sekä maksimi- ja minimiarvot viikoilla 6 (6.-10.2) ja 7 (13.-17.2.)

Oppituntien aikana vk 6	0,1 m	1,1 m	1,7 m	2,4 m
Suhteellinen kosteus keskiarvo [%]	18,8	17,9	18,0	16,5
Minimiarvo [%]	6,8	7,4	7,1	6,1
Maksimiarvo [%]	33,7	28,1	28,4	26,2
Oppituntien aikana vk 7				
Suhteellinen kosteus keskiarvo [%]	20,5	19,4	19,4	18,0
Minimiarvo [%]	13,6	13,1	12,6	11,5
Maksimiarvo [%]	29,4	24,5	24,8	23,1

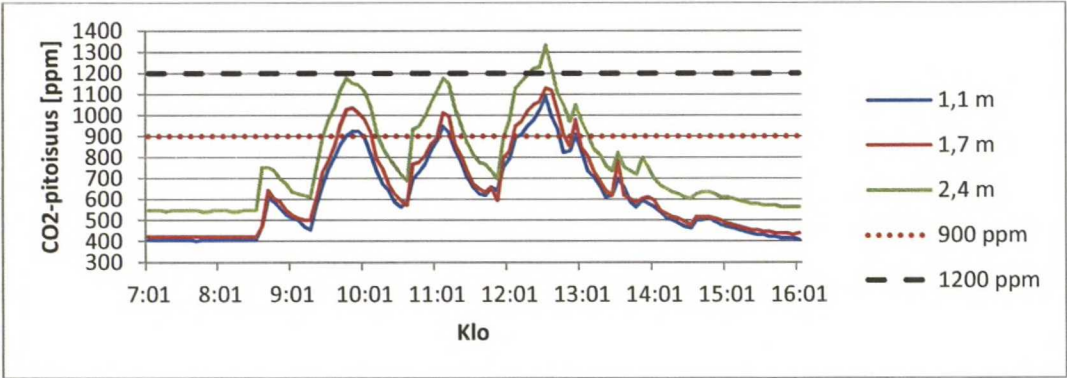
Hiilidioksidipitoisuuksien keskiarvo ja maksimiarvo 1,1 ja 1,7 metrin korkeuksilla viikolla 6 on esitetty taulukossa 14 ja viikolla 7 taulukossa 15. Hiilidioksidipitoisuudet mitattiin korkeuksilta 1,1 m, 1,7 m ja 2,4 m. 2,4 metrin korkeudella oleva hiilidioksidimittari oli kuitenkin epäkunnossa, mikä havaittiin vasta mittaustuloksia käsitellessä. Mittari näytti liian suuria lukemia, tästä syystä mittarin tulokset jätetään huomioitta. Hiilidioksidipitoisuudet eri korkeuksilla 13.2.2012 on esitetty kuvassa 24.

Taulukko 14. Hiilidioksidipitoisuus eri korkeuksilla viikolla 6 (6.-10.2)

Oppituntien aikana vk 6	1,1 m	1,7 m
Hiilidioksidipitoisuuden keskiarvo [ppm]	922	963
Maksimi [ppm]	1365	1451

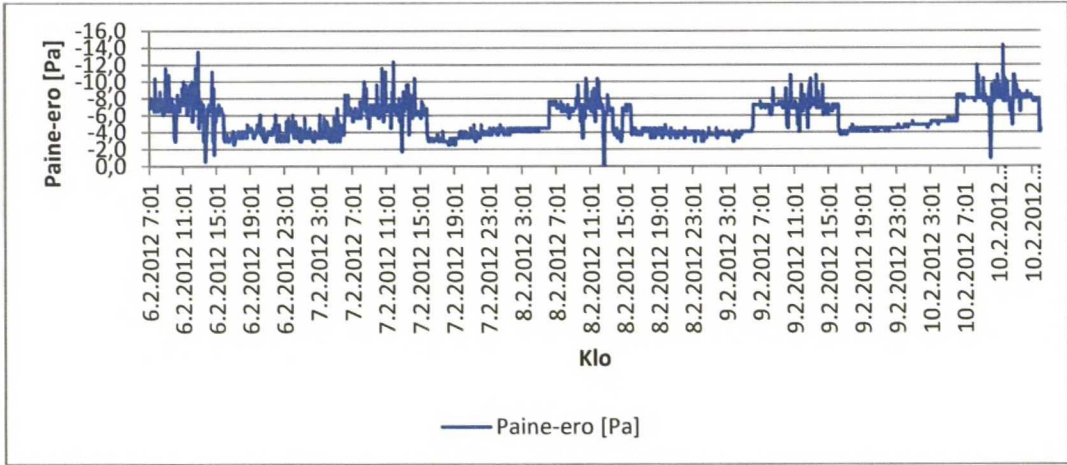
Taulukko 15. Hiilidioksidipitoisuus eri korkeuksilla viikolla 7 (13.-17.2.)

Oppituntien aikana vk 7	1,1 m	1,7 m
Hiilidioksidipitoisuuden keskiarvo [ppm]	732	777
Maksimi [ppm]	1090	1129

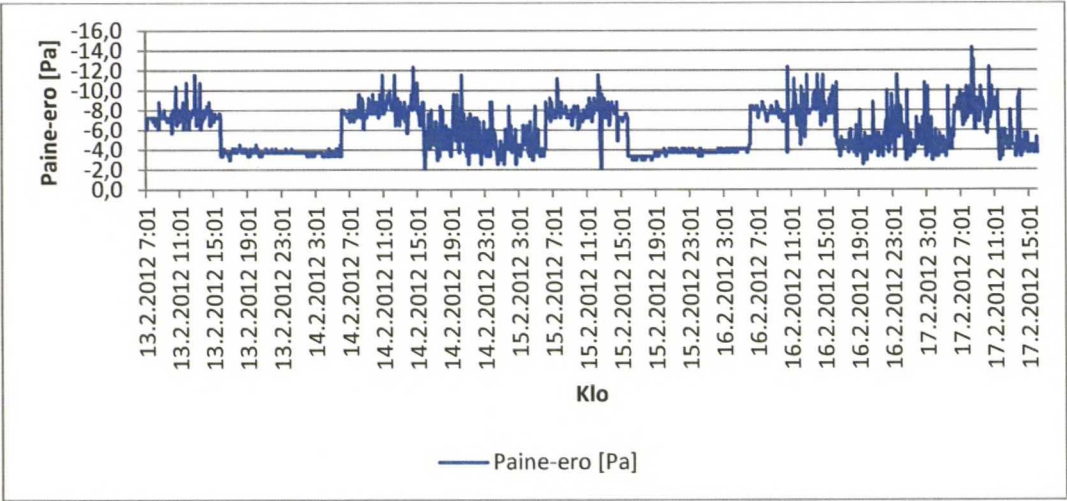


Kuva 24. Luokan 4 hiilidioksidipitoisuudet eri korkeuksilla 13.2.2012

Kuvassa 25 on esitetty luokan 4 paine-ero ulkoilmaan nähden viikolla 6 ja kuvassa 26 paine-ero viikolla 7.



Kuva 25. Luokan 4 paine-ero ulkovaipan yli 6.-10.2.2012



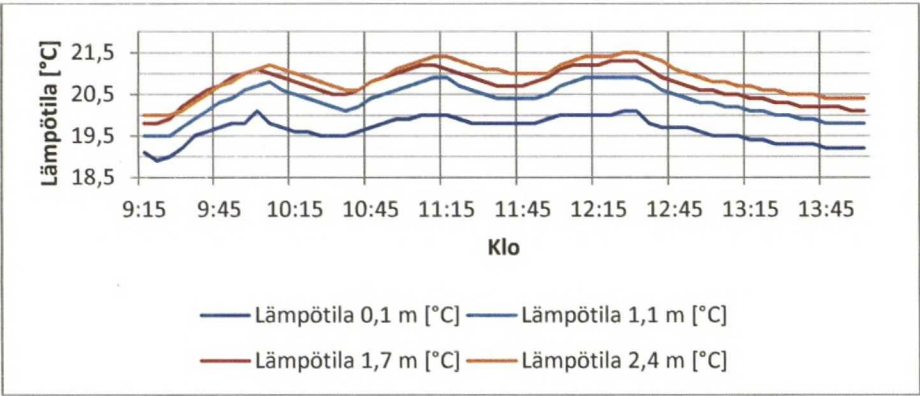
Kuva 26. Luokan 4 paine-ero ulkovaipan yli 13.-17.2.2012

6.4.4 Luokka 4: Tilakohtainen ilmastointikone vakioilmavirralla

Viikolla 16 (16.–20.4.) ilmastointikone kävi vakioilmavirralla 140 dm³/s ja tuloilman lämpötilan asetusarvona pidettiin vakiolämpötilaa 18 °C. Torstaina 19.4. luokassa oli poikkeavaa ohjelmaa, joten kyseisen päivän mittaustuloksia ei huomioitu. Ilman lämpötilojen keskiarvot minimi- ja maksimiarvoineen eri korkeuksilla on esitetty taulukossa 16. Kuvassa 27 on esitetty lämpötilat koulupäivän aikana eri korkeuksilla 18.4.

Taulukko 16. Ilman lämpötilat eri korkeuksilla 16.-20.4.2012

Oppituntien aikana vk 16 (ei 19.4.)	0,1 m	1,1 m	1,7 m	2,4 m
Ilman lämpötilan keskiarvo [°C]	20,0	20,8	21,2	21,3
Minimi [°C]	18,9	19,5	19,8	20,0
Maksimi [°C]	21,0	22,3	22,5	22,4



Kuva 27. Luokka 4 lämpötilat eri korkeuksilla 18.4.

Taulukossa 17 on esitetty suhteellisen kosteuden keskiarvo sekä minimi- ja maksimiarvot eri korkeuksilla 16.-20.4.

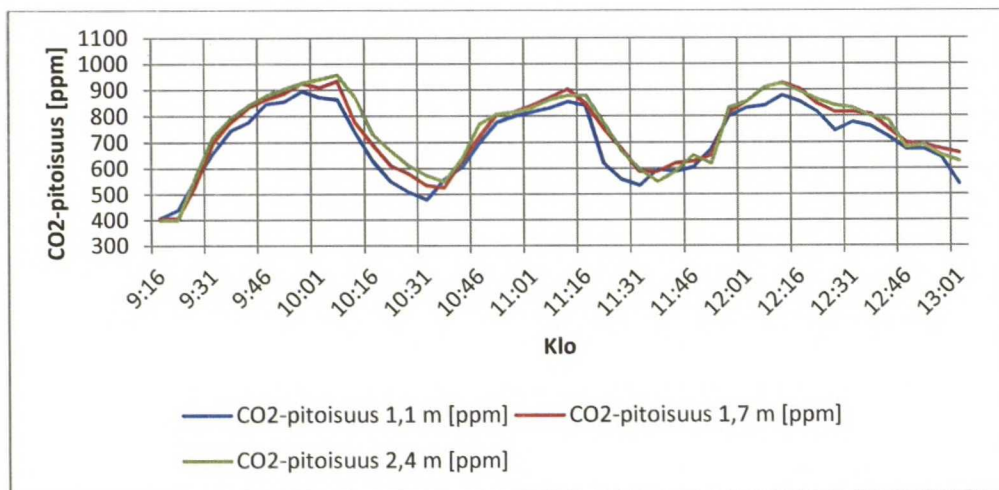
Taulukko 17. Ilman suhteellinen kosteus eri korkeuksilla 16.-20.4.2012 (ei 19.4.)

Oppituntien aikana vk 16 (ei 19.4.)	0,1 m	1,1 m	1,7 m	2,4 m
Suhteellinen kosteus keskiarvo [%]	29,9	29,9	30,0	28,4
Minimiarvo [%]	24,8	24,4	24,9	23,2
Maksimiarvo [%]	37,1	36	35,8	34,9

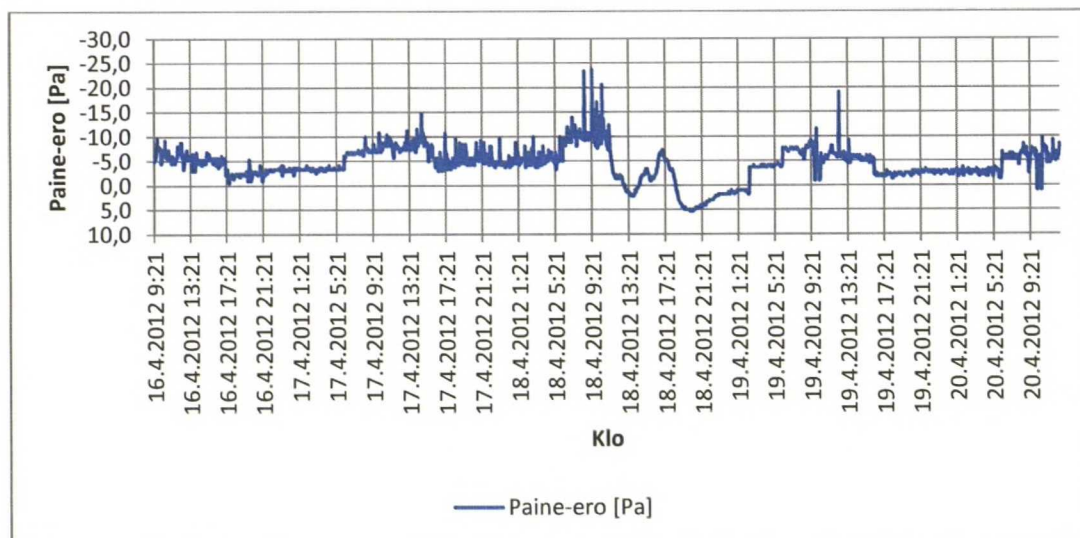
Luokasta 4 mitattiin myös hiilidioksidipitoisuudet eri korkeuksilta viikolla 16 ilmastointikoneen käydessä 140 dm³/s vakioilmavirralla. Hiilidioksidipitoisuuden keskiarvot maksimiarvoineen eri korkeuksilla viikolla 16 on esitetty taulukossa 18. Kuvassa 28 on esitetty hiilidioksidipitoisuus eri korkeuksilla 18.4. Luokan 4 paine-ero ulkoilmaan nähden viikolla 16 on esitetty kuvassa 29.

Taulukko 18. Hiilidioksidipitoisuus eri korkeuksilla 16.-20.4.2012 (ei 19.4.)

Oppituntien aikana vk 16 (ei 19.4.)	1,1 m	1,7 m	2,4 m
Hiilidioksidipitoisuuden keskiarvo [ppm]	786	810	814
Maksimi [ppm]	1192	1208	1286



Kuva 28. Luokka 4 hiilidioksidipitoisuudet eri korkeuksilla 18.4.



Kuva 29. Luokan 4 paine-ero ulkovaipan yli 16.4.-20.4.

19.4. luokassa suoritettiin ilman nopeusmittauksia sekä äänitasomittauksia. Ilman nopeudet mitattiin kahdella eri ilmavirralla: 140 dm³/s ja 200 dm³/s. Ilman keskinopeudet minimi- ja maksimiarvoineen sekä keskihajontoineen eri mittauspisteistä on esitetty taulukoissa 19-21. Taulukoissa on esitetty myös ilman keskilämpötila ja vetoriski laskettuna ISO 7730 –standardin mukaisesti kaavalla (1) [4].

Ilmavirralla 200 dm³/s mittaukset suoritettiin ilman oppilaita sekä oppilaiden läsnä ollessa. 140 dm³/s ilman nopeudet mitattiin ainoastaan oppilaiden läsnä ollessa. Ilman nopeudet mitattiin 5 cm korkeudelta lattiasta. Tuloilman lämpötilaksi oli asetettu 18 °C.

Ilman nopeusmittauksien ja äänitasomittauksien mittauspisteet on esitetty kuvassa 13 (s. 58).

Taulukko 19. Ilman nopeudet eri mittauspisteistä ilmavirralla 200 dm³/s oppilaiden läsnä ollessa

Mittauspiste	1	2	3	4	5	6	7
Keskiarvo [m/s]	0,185	0,315	0,187	0,06	0,257	0,344	0,33
Maksimi [m/s]	0,689	0,45	0,345	0,114	0,445	0,547	0,61
Minimi [m/s]	0	0,185	0,028	0,018	0,074	0,15	0,106
Keskihajonta [m/s]	0,088	0,037	0,054	0,02	0,066	0,072	0,08
Keskilämpötila [°C]	18,7	18,2	18,2	19	19,3	18,5	18,3
Vetoriski DR [%]	28,3	31,3	23,7	3,3	30,9	42,1	43,5

Taulukko 20. Ilman nopeudet eri mittauspisteistä ilmavirralla 200 dm³/s luokan ollessa tyhjillään

Mittauspiste	1	2	3	4	5	6	7
Keskiarvo [m/s]	0,219	0,316	0,155	0,1	0,276	0,301	0,314
Maksimi [m/s]	0,398	0,425	0,293	0,183	0,513	0,519	0,523
Minimi [m/s]	0,077	0,187	0,026	0,01	0,079	0,064	0,074
Keskihajonta [m/s]	0,052	0,037	0,048	0,033	0,075	0,076	0,075
Keskilämpötila [°C]	18,3	17,6	17,7	18,4	18,7	18,6	18,5
Vetoriski DR [%]	26,4	32,5	19,8	10,6	36	38,9	40,1

Taulukko 21. Ilman nopeudet eri mittauspisteistä ilmavirralla 140 dm³/s oppilaiden läsnä ollessa

Mittauspiste	1	2	3	4	5	6	7
Keskiarvo [m/s]	0,145	0,252	0,118	0,068	0,239	0,3	0,281
Maksimi [m/s]	0,225	0,335	0,256	0,208	0,444	0,502	0,508
Minimi [m/s]	0,057	0,171	0,016	0	0,084	0,069	0,114
Keskihajonta [m/s]	0,027	0,027	0,042	0,035	0,057	0,069	0,064
Keskilämpötila [°C]	18,7	18,2	18,3	19,5	19,6	18,9	18,6
Vetoriski DR [%]	14,7	24,3	13,9	5,3	26,9	36,4	34,2

Luokan äänitaso mitattiin koneen käydessä 200 dm³/s ilmavirralla, 140 dm³/s ilmavirralla sekä koneen ollessa pois päältä. Äänitaso mitattiin kahdesta mittauspisteestä 1 minuut-

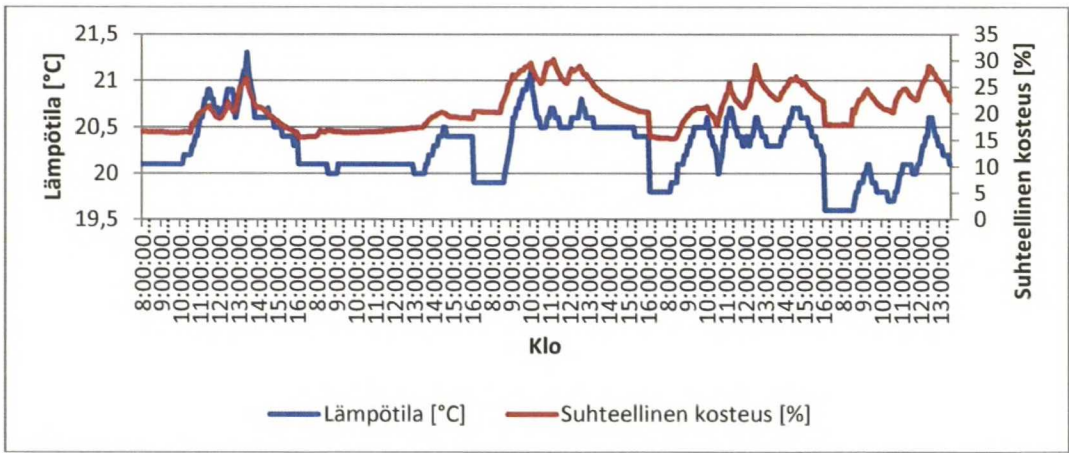
tin ajan, jolloin saatiin keskiäänitaso mittauspisteessä. Taulukossa 22 on esitetty mitatut äänitasot eri tilanteissa.

Taulukko 22. Keskiäänitaso eri tilanteissa kahdesta mittauspisteestä

		$L_{A,eq}$ [dB]
200 l/s	Mittauspiste 1	33,6
	Mittauspiste 4	34,8
Kone seis	Mittauspiste 1	26,6
	Mittauspiste 4	27,9
140 l/s	Mittauspiste 1	30
	Mittauspiste 4	29,9

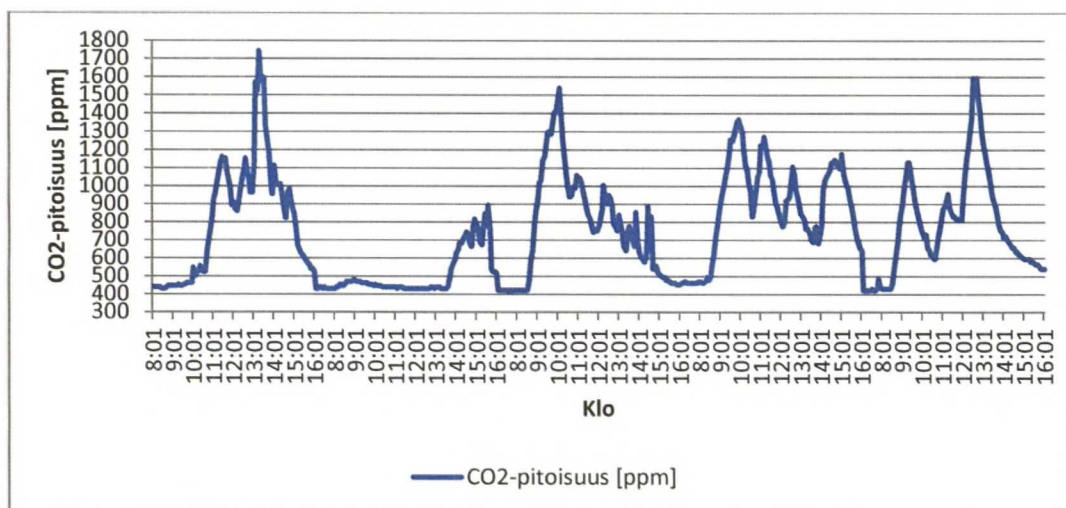
6.4.5 Luokka 5: Koneellinen poistoilmanvaihto puolella teholla

Viikolla 7 (13.-17.2.) luokassa 5 oli käytössä koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä, joka kävi puoliteholla. Poistoilmamäärä venttiilistä A oli 17,8 dm³/s ja venttiilistä B 15,5 dm³/s. Yhteensä luokan 5 poistoilmamäärä oli siis 33,3 dm³/s, joka vastaa 16 oppilaan ja opettajan luokassa noin 1,96 dm³/s ilmamäärää henkilöä kohden.

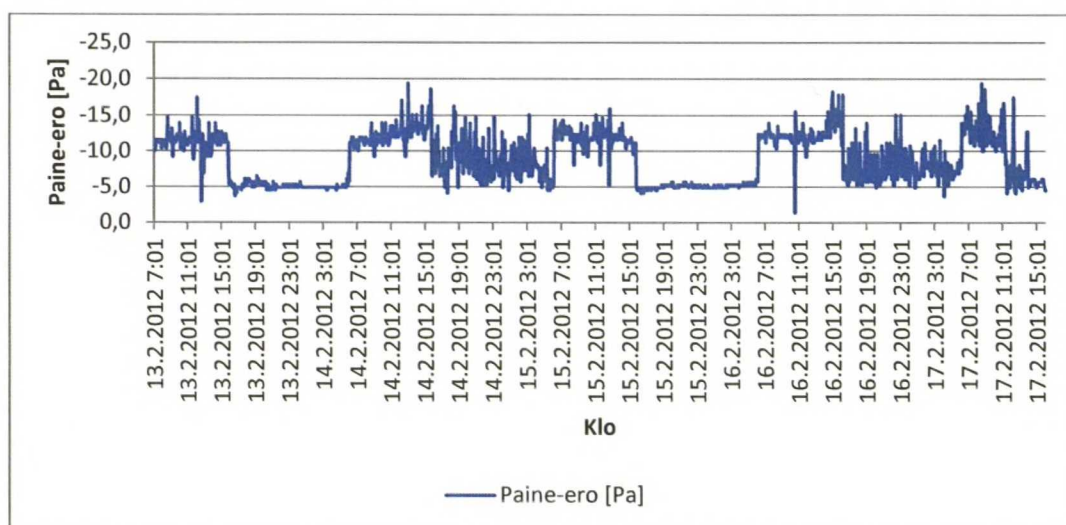


Kuva 30. Luokan 5 lämpötila ja suhteellinen kosteus 13.-17.2.2012 koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä puoliteholla

Luokan 5 lämpötila ja suhteellinen kosteus on esitetty kuvassa 30, hiilidioksidipitoisuus kuvassa 31 ja luokan ja ulkoilman välinen paine-ero kuvassa 32.



Kuva 31. Luokan 5 hiilidioksidipitoisuus 13-17.2.2012 koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä puolella teholla

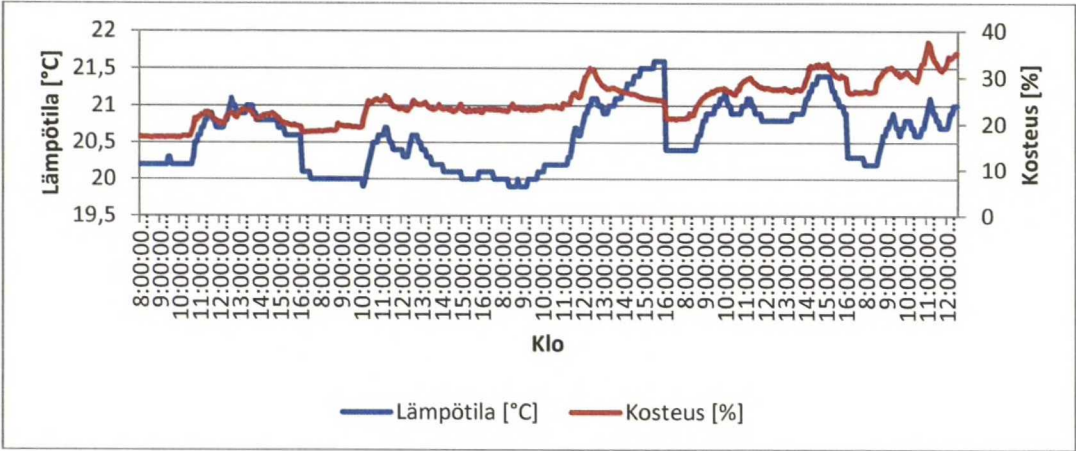


Kuva 32. Luokan 5 paine-ero ulkovaipan yli 13-17.2.2012 koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä puolella teholla

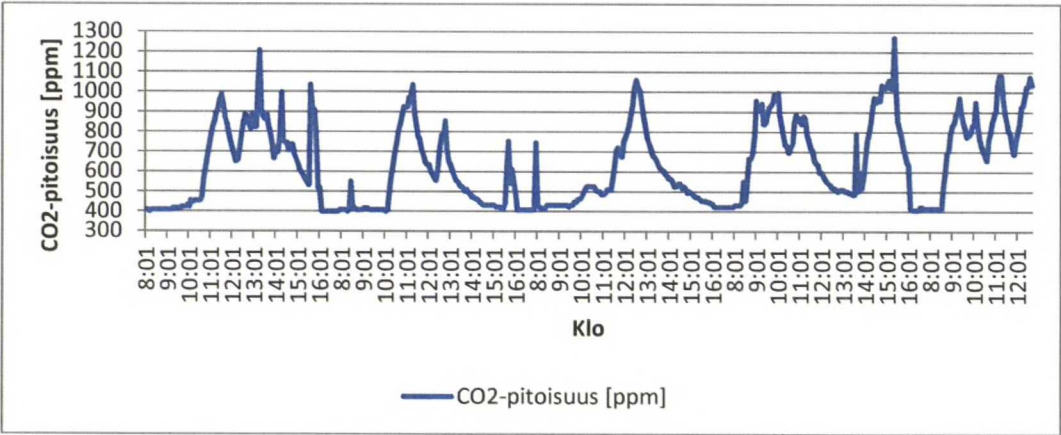
6.4.6 Luokka 5: Koneellinen poistoilmanvaihto täydellä teholla

Viikolla 9 (27.2-2.3.) koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä kävi täydellä teholla. Poistoilmavirta oli venttiilistä A 35,6 dm³/s ja venttiilistä B 32,2 dm³/s, eli yhteensä 67,8 dm³/s. Tämä vastaa 16 oppilaan ja opettajan luokassa noin 4 dm³/s poistoilmavirtaa henkilöä kohden.

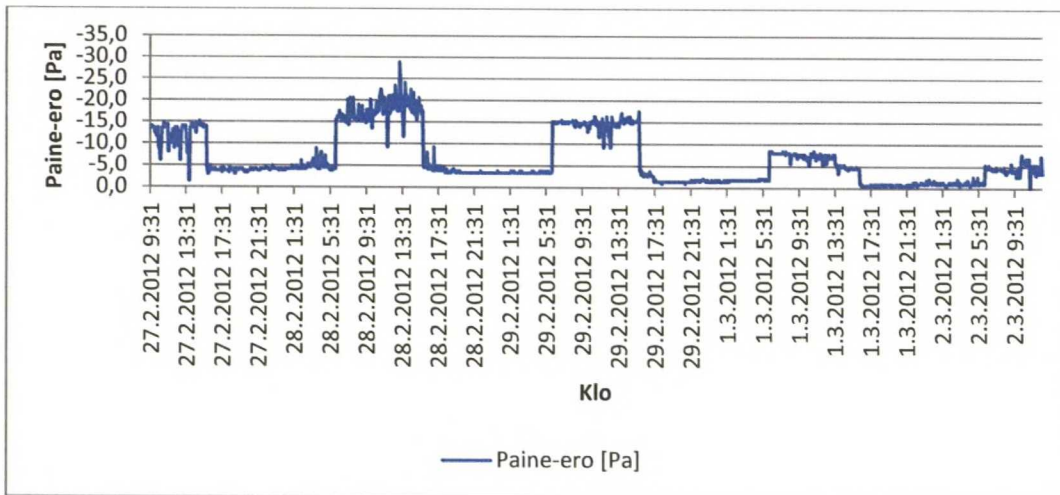
Luokan 5 lämpötila ja suhteellinen kosteus 27.2.-2.3. on esitetty kuvassa 33, hiilidioksidipitoisuus kuvassa 34 ja paine-ero luokan ja ulkoilman välillä kuvassa 35.



Kuva 33. Luokan 5 lämpötila ja suhteellinen kosteus 27.2-2.3. koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä täydellä teholla



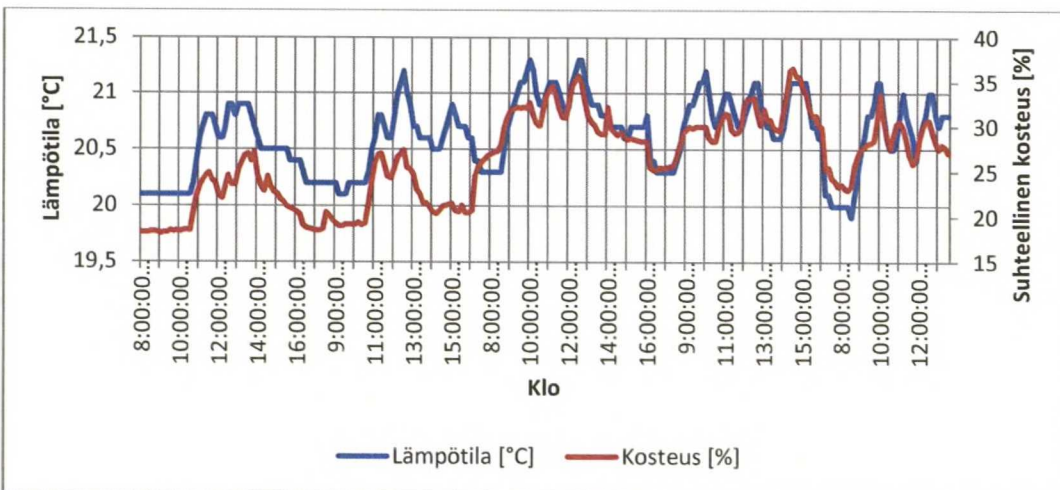
Kuva 34. Luokan 5 hiilidioksidipitoisuus 27.2-2.3. koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä täydellä teholla



Kuva 35. Luokan 5 paine-ero ulkovaipan yli 27.2-2.3. koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä täydellä teholla

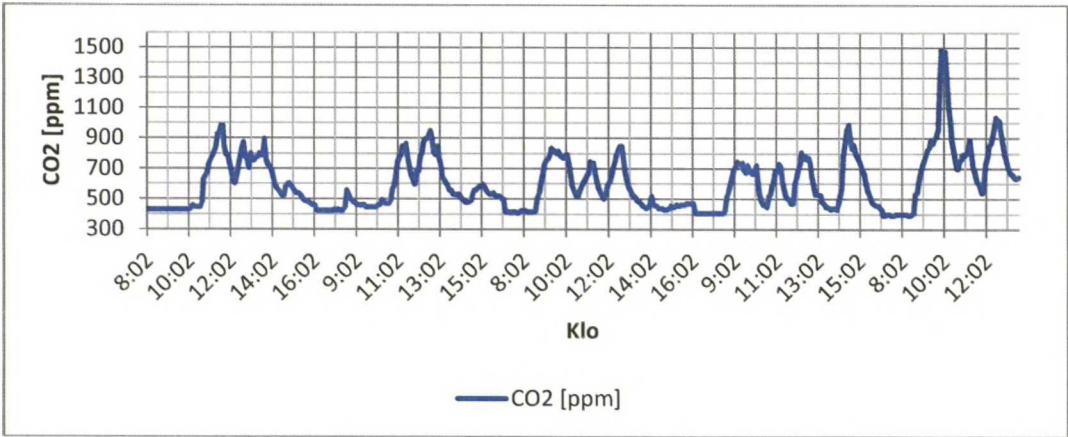
6.4.7 Luokka 5: Tilakohtainen ilmastointikone tarpeenmukaisella ohjauksella

Viikolla 2 (9.-13.1.) luokan 5 ilmastointikone oli asetettu tarpeenmukaiselle ohjaukselle ison ilmavirran asetusarvon ollessa 160 dm³/s. Luokan 5 lämpötila ja suhteellinen kosteus 9.1.-13.1. on esitetty kuvassa 36.

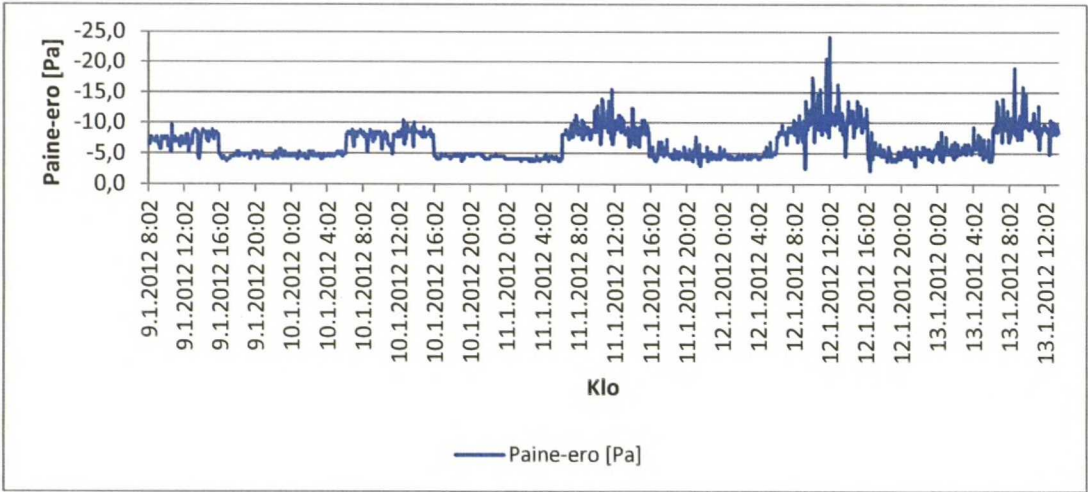


Kuva 36. Luokan 5 lämpötila ja suhteellinen kosteus 9.-13.1. ilmastointikoneen käydessä tarpeenmukaisella ohjauksella

Luokan 5 hiilidioksidipitoisuus on esitetty kuvassa 37 ja luokan paine-ero ulkoilmaan nähden kuvassa 38.



Kuva 37. Luokan 5 hiilidioksidipitoisuus 9.-13.1. ilmastointikoneen käydessä tarpeenmukaisella ohjauksella



Kuva 38. Paine-ero luokan 5 ulkovaipan yli 9.1.-13.1. ilmastointikoneen käydessä tarpeenmukaisella ohjauksella

6.5 Mittaustulosten tarkastelu

6.5.1 Luokka 4: Ilmamäärät

Taulukossa 23 on esitetty luokan kokonaisilmamäärä, ilmamäärä henkilöä ja pinta-alayksikköä kohti sekä ilmanvaihtokerroin eri ilmastointijärjestelmillä. Tarpeenmukai-

sen ohjauksen ilmastoinnin tapauksessa ilmamääränä on esitetty ilmamäärien keskiarvo oppituntien aikana. Luokan henkilömääränä on käytetty 23 henkilöä, pinta-alana 63 m² ja tilavuutena 189 m³.

Taulukko 23. Luokan 4 ilmamäärät ja ilmanvaihtokerroin eri järjestelmillä

Järjestelmä	q _v [dm ³ /s]	q _v [(dm ³ /s)/hlö]	q _v [(dm ³ /s)/m ²]	n [1/h]
Koneellinen poistoilmanvaihto				
Täysi teho	53	2,3	0,8	1,0
Puoli teho	24,4	1,1	0,4	0,5
Tilakohtainen ilmastointikone				
Tarpeenmukainen ohjaus max. 180 dm ³ /s	101	4,4	1,6	1,9
Tarpeenmukainen ohjaus max. 200 dm ³ /s	108	4,7	1,7	2,1
Vakioilmavirta 140 dm ³ /s	140	6,1	2,2	2,7

Rakentamismääräyskokoelman D2 mukaan ulkoilmavirran opetustiloissa on oltava 6 dm³/s henkilöä kohden tai 3 dm³/s neliometriä kohden. Ensisijaisesti olisi käytettävä henkilöperusteista mitoitusta [1].

Koneellisen poistojärjestelmän ilmamäärät jäävät selvästi rakentamismääräysten alapuolelle. Henkilöä kohden poistoilmamäärä koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käytössä puoliteholla jäi alle 20 %:iin ja täydellä tehollakin alle 40 %:iin rakentamismääräysten mukaisista ilmamääristä. Koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän tapauksessa luokasta 4 mitatut ilmamäärät olivat tosin alhaisempia kuin kyseisessä koulussa aiemmin suoritettujen ilmamäärämittausten keskiarvo. Keskimäärin ilmamäärä pinta-alayksikköä kohti koulun kaikista luokista oli 1,1 dm³/s poistoilmanvaihtojärjestelmän käytössä täydellä teholla ja 0,6 dm³/s sen käytössä puoliteholla [19]. Kurnitskin ym. suorittamissa koulujen sisäilmastomittauksissa koneellisen poistoilmanvaihdon ilmamäärä henkilöä kohden oli keskimäärin 2,3 dm³/s, eli sama kuin tässä tutkimuksessa luokan 4 ilmamäärä koneellisen poiston käytössä täydellä teholla [14].

Myös tilakohtaisen ilmastointikoneen tarpeenmukaisessa ohjauksessa keskimääräiset ilmamäärät jäävät rakentamismääräysten alle, joskin on huomioitava se, että tarpeenmukaisen ohjauksen tavoite ei ole pitää yllä tiettyä ilmamäärää. Sen tarkoitus on säätää tuloilmamäärää ja mahdollisesti tuloilman lämpötilaa joko tilassa vallitsevien lämpöolosuhteiden tai ilman laadun perusteella laitteeseen ohjelmoitujen parametrien mukaisesti.

Tilakohtaisen ilmastointikoneen vakioilmavirran suuruus asetettiin siten, että 6 dm³/s henkilöä kohden täyttyy, joten sen määrää ei ole tarve tarkemmin analysoida. Tarkoitus

oli tutkia, millaiset sisäilmasto-olosuhteet tällä määräysten mukaisella ilmavirralla saadaan aikaan.

6.5.2 Luokka 4: Lämpötila

Rakentamismääräyskokoelman osan D2 ohjeen ja Sisäilmastoluokitus 2008 S3-luokan mukaan oleskelualueen lämpötila 1,1 metrin korkeudella saa olla 20-22 °C [1, 2]. Sisäilmastoluokitus 2008 S2-luokassa lämpötila saa olla 20,5-22,5 °C ulkolämpötilan ollessa alle 10 °C [2]. Lisäksi S2-luokassa olosuhteiden pysyvyys opetustiloissa tulee olla 90 % käyttöajasta.

Koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä puolella teholla 9.-13.1.2012 luokan lämpötila 1,1 metrin korkeudelta mitattuna pysytteli välillä 20,7–22,7 °C keskiarvon ollessa 21,8 °C. Ulkolämpötila kyseisellä ajanjaksolla vaihteli -6...+3 °C välillä. Lämpötila oleskelualueella täytti S2-luokan lämpötilavaatimuksen, sillä se ylitti 22,5 °C vain 6 % oppituntien ajasta.

Koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä täydellä teholla 27.2.–2.3. välisellä ajalla luokan sisälämpötila 1,1 metrin korkeudella pysytteli oppituntien aikana pääosin 20-22 °C välillä. Keskiarvo lämpötilalle oli 21,3 °C. 2 % oppituntien ajasta lämpötila alitti S2-luokan alimman sallitun lämpötilan 20 °C ollen alimmillaan 19,0 °C. Lämpötilaolosuhteita luokassa voidaan pitää kuitenkin rakentamismääräykset ja S3-luokan vaatimukset täyttävinä. Ulkolämpötila vaihteli samalla ajanjaksolla noin -6...+4 °C välillä.

Myös 23.–27.4. koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä kävi täydellä teholla. Sisälämpötila vaihteli 20,6–23,2 °C välillä ulkolämpötilan vaihdellessa noin +3...+13 °C välillä. Sisälämpötilan keskiarvo oli 21,7 °C. Sisälämpötila ylitti 22,5 °C vain 8 % oppituntien ajasta korkeimman mitatun lämpötilan ollessa 23,2 °C, joten merkittävää yllämpenemistä luokassa ei havaittu, ja olosuhteiden pysyvyydenkin valossa sisäilmasto-luokan S2 lämpötilavaatimukset täyttyivät.

Tilakohtainen ilmastointikone oli asetettu tarpeenmukaiselle ilmanvaihdolle 6.-10.2. siten, että ison ilmavirran asetusarvo oli 180 dm³/s. Ulkolämpötila vaihteli kyseisellä viikolla -3...-20 °C välillä ja sisälämpötila luokassa oppituntien aikana 1,1 metrin korkeudella 19,9-23,4 °C välillä keskiarvon ollessa 21,6 °C. Lämpötila ylitti 22,5 °C 14 % op-

pituntien ajasta. Näin ollen luokan sisälämpötila ei aivan täyttänyt rakentamismääräysten ja S2- tai S3-luokan lämpötilavaatimuksia.

Suurimmat ylälämpötilat esiintyivät maanantaina 6.2. Maanantain 6.2. ylälämpötilat saattavat selittyä sillä, että 5.2. ulkolämpötila oli vielä klo 12 aikaan noin $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, jonka jälkeen se nousi noin $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$:een seuraavaan aamuun mennessä. Ulkolämpötilan alettua 5.2. lauhtua myös sisälämpötila nousi yli $22\text{ }^{\circ}\text{C}$:een, vaikka luokka oli tyhjillään. Tämä viittaa siihen, että patteriverkoston menoveden lämpötila-asetus oli vielä ulkolämpötilan noustuakin liian korkea kovien pakkasten jäljiltä, mikä aiheutti tilan ylälämpenemistä.

13.-17.2. tilakohtainen ilmastointikone oli tarpeenmukaisella ohjauksella siten, että sen ison ilmapirran asetusarvo oli $200\text{ dm}^3/\text{s}$. Ulkolämpötila vaihteli kyseisellä ajanjaksolla välillä $-2\ldots-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja sisälämpötila oppituntien aikana 1,1 metrin korkeudessa välillä $20,9\text{--}22,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ keskiarvon ollessa $21,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lämpötila ylitti $22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ vain 4 % ajasta, joten sisälämpötilaa täytti sisäilmastoluokan S2 lämpötilavaatimuksen $20,5\text{--}22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja olosuhteiden pysyvyysvaatimuksen, joka on 90 % käyttöajasta.

Tilakohtaisen ilmastointikoneen käydessä 16.–20.4. vakioilmapirralla $140\text{ dm}^3/\text{s}$ luokan lämpötila oleskelualueella pysytteli $19,5\text{--}22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa keskiarvon ollessa $20,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Alhaisimmat lämpötilat esiintyivät koulupäivän alussa, kun luokan ilmastointikone oli käynnistynyt klo 07 ja alkanut puhalttaa sisään $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ tuloilmaa. Luokassa ei tällöin ollut vielä lämpökuormia ihmisistä, joten luokan lämpötila laski hieman ilmastointikoneen käynnistymisen jälkeen, mikä aiheutti koulupäivän alkuun alhaisempia sisälämpötiloja.

Lämpötila oli alle $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 5 % ajasta ja yli $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 4 % ajasta oppituntien aikana, joten lämpötilat pysyttelivät pääosin hyväksyttävällä tasolla sekä rakentamismääräyksiin ja S3-luokkaan verrattessa. Lämpötila kuitenkin alitti $20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ jopa 20% ajasta, joten sisäilmastoluokan S2-vaatimustaso ei täyttynyt. Ulkoilman lämpötila vaihteli mittausjaksolla $0\ldots+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ välillä.

6.5.3 Luokka 4: Lämpötilan kerrostuminen

Taulukossa 24 on esitetty lämpötilaerot eri korkeuksien välillä eri ilmanvaihtojärjestelmissä. Taulukosta nähdään, että lämpötilan kerrostuminen kaikissa ilmanvaihtojärjestelmissä oli suurinta 0,1 ja 1,1 metrin välillä. Tilakohtaisen ilmastointikoneen tarpeenmukaista ohjausta käytettäessä lämpötilan kerrostuminen 0,1 ja 1,1 metrin välillä oli

selvästi voimakkaampaa kuin käytettäessä tilakohtaisen ilmastointikoneen vakioilmavirtaohjausta tai koneellista poistoilmanvaihtojärjestelmää.

0,1 ja 1,1 metrin välinen vertikaalinen lämpötilaero ei kuitenkaan ylittänyt missään olosuhteissa oppituntien aikana 3 °C/m, mikä on Sisäilmastoluokitus 2008 S2-luokan enimmäisvaatimus. Koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä ja ilmastointikoneen käydessä vakioilmavirralla ei myöskään ylittynyt S1-luokan enimmäisarvo 2 °C/m.

Taulukko 24. Lämpötilaerot eri korkeuksien välillä eri ilmanvaihtojärjestelmillä

Ilmanvaihtojärjestelmä	Lämpötilaero ka [°C]	Maksimi [°C]	Minimi [°C]
Tilakohtainen ilmastointikone			
Tarpeenmukainen ohjaus max. 180 dm³/s:			
0,1 - 1,1 m	1,48	2,80	1,00
1,1 - 1,7 m	0,45	2,20	0,30
1,7 - 2,4 m	0,39	0,80	0,00
Tarpeenmukainen ohjaus max. 200 dm³/s:			
0,1 - 1,1 m	1,41	2,30	1,00
1,1 - 1,7 m	0,43	0,70	0,30
1,7 - 2,4 m	0,28	0,50	0,10
Vakioilmavirta 140 dm³/s:			
0,1 - 1,1 m	0,82	1,30	0,40
1,1 - 1,7 m	0,38	0,80	0,00
1,7 - 2,4 m	0,05	0,30	-0,20
Koneellinen poistoilmanvaihto			
Täysi teho 53 dm³/s:			
0,1 - 1,1 m	0,56	1,20	0,20
1,1 - 1,7 m	0,31	0,60	0,00
1,7 - 2,4 m	0,08	0,40	-0,30

Ilmastointikoneen tuloilman lämpötila vaihteli pääosin noin 17,5-18,0 °C:ssa käytettäessä tarpeenmukaista ohjausta. Käytettäessä vakioilmavirtaa tuloilman lämpötila oli noin 18 °C, joten tuloilman lämpötila ei ole syynä tarpeenmukaisessa ilmanvaihdossa ilmenneisiin korkeampiin lämpötilaeroihin 0,1 ja 1,1 metrin välillä. Myöskään 0,1 metrin korkeudella sijaitsevan lämpötilamittarin mittaamissa lämpötiloissa ei ollut merkittäviä eroja, vaan lämpötila oli samaa suuruusluokkaa käytettäessä tilakohtaisessa ilmastointikoneessa tarpeenmukaista ilmanvaihtoa ja vakioilmavirtaa. Koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä 0,1 metrin korkeudella lämpötila oli korkeampi kuin tila-

kohtaisen ilmastointikoneen ollessa käytössä johtuen siitä, että tilakohtainen ilmastointikone puhaltaa huonelämpötilaa viileämmän tuloilman lattiaa pitkin luokkaan.

Suuremman keskimääräisen lämpötilaeron 0,1 ja 1,1 metrin välille tarpeenmukaista ohjausta käytettäessä aiheuttaa korkeampi keskimääräinen lämpötila 1,1 metrin korkeudessa. Tämä korkeampi lämpötila 1,1 metrin korkeudessa ei kuitenkaan näytä selittyvän ilmamäärienkään eroilla. Lämpötilaero on vakioilmavirtaohjausta korkeampi sekä silloin kun luokkaan tuotiin tarpeenmukaisessa ohjauksessa pieniä ilmamääriä että silloin kun ilmamäärät kasvoivat. Todennäköisempi syy suuremmille lämpötilaeroille on se, että tarpeenmukaisen ilmanvaihdon olosuhteita mitattaessa oli helmikuu ja ulkolämpötilat olivat alhaisia. Luokassa esiintyi hieman turhan korkeita lämpötiloja johtuen luultavimmin liian korkeasta patteriverkoston menoveden lämpötilasta tai termostaattisten patteriventtiilien toimintahäiriöstä.

1,1 ja 1,7 metrin välillä lämpötilaerot olivat kaikilla järjestelmillä keskimäärin hyvin samansuuruisia vaihdellen välillä 0,31-0,45 °C. 1,7 ja 2,4 metrin välillä ilmastointikoneen käydessä tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla lämpötilaerot olivat hieman suurempia kuin muissa ilmanvaihtoratkaisuissa. Lämpötilaerot muilla kuin 0,1 ja 1,1 metrin välillä olivat kuitenkin kaiken kaikkiaan mitättömän pieniä varsinkin kun huomioidaan se, että lämpötilamittarin epätarkkuus on $\pm 0,5$ °C, jolloin lämpötilaeron virheraja virheiden yhdistämislailla on $\pm 0,7$ °C.

6.5.4 Luokka 4: Hiilidioksidipitoisuus

Taulukossa 25 on esitetty luokan 4 hiilidioksidipitoisuuksien keskiarvot ja maksimiarvot eri ilmanvaihtojärjestelmillä oppituntien aikana viikon seurantamittausten perusteella. Taulukossa esitetyt arvot on mitattu 1,1 metrin korkeudelta. Taulukossa on myös verrattu hiilidioksidipitoisuuden pysyvyyttä rakentamismääräyskokoelman osan D2 ja Sisäilmastoluokitus 2008:n sisäilmastoluokkien S1-S3 hiilidioksidipitoisuuden enimmäisarvoihin [1, 2].

Taulukko 25. Luokka 4 hiilidioksidipitoisuuksien keskiarvo oppituntien aikana viikon seurantamittauksina maksimiarvoineen, sekä olosuhteiden pysyvyyden vertailu määräyksien ja ohjeiden raja-arvoihin

Järjestelmä			Olosuhteiden pysyvyys [%]		
	CO ₂ , ka [ppm]	CO ₂ , max [ppm]	S1 < 750 ppm	S2 < 900 ppm	S3, RakMk D2 < 1200 ppm
Koneellinen poistoilmanvaihto					
Täysi teho viikko 17	949	1365	23	40	85
Täysi teho viikko 09	878	1325	26	54	88
Puoli teho	1250	2000	8	12	43
Tilakohtainen ilmastointikone					
Tarpeenmukainen ohjaus max. 180 dm³/s	922	1365	25	39	84
Tarpeenmukainen ohjaus max. 200 dm³/s	732	1090	51	81	100
Vakioilmavirta 140 dm³/s	786	1192	29	68	100

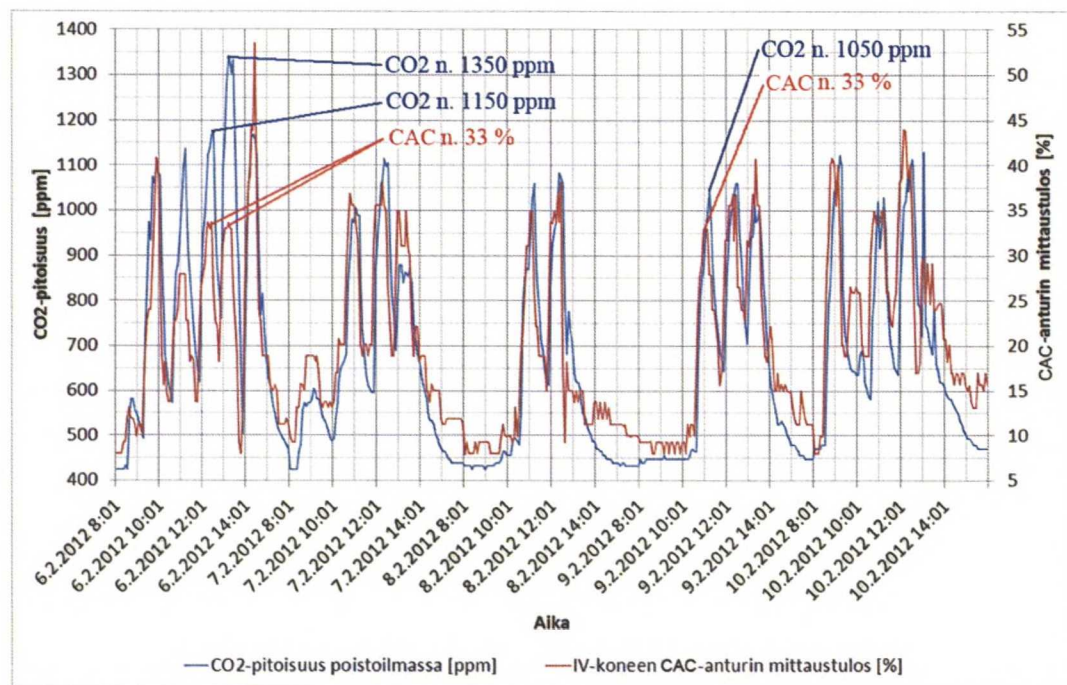
Taulukosta 25 nähdään, että koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä puoliteholla luokassa 4 hiilidioksidipitoisuus ylitti 57 % oppitunneista arvon 1200 ppm, joka on rakentamismääräyskokoelman ja sisäilmastoluokan 3 enimmäisarvo. Lisäksi hiilidioksidipitoisuus ylitti jopa vuoden 1978 rakentamismääräyskokoelman tavoitearvon 1500 ppm 26 % oppitunneista. Enimmillään hiilidioksidipitoisuus kohosi 2000 ppm:n. Koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä puoliteholla ei riitä lähellekään täyttämään nykyisiä rakentamismääräyksiä tai alimman sisäilmastoluokan S3 vaatimuksia. Ilmämäärä henkilöä kohden oli tässä tapauksessa hyvin alhainen, vain 1,1 dm³/s ja tämä ilmenee korkeina hiilidioksidipitoisuuksina.

Koneellisen poistoilmanvaihdon käydessä täydellä teholla viikolla 9 hiilidioksidipitoisuus ylitti alimman sisäilmastoluokan S3 ja rakentamismääräyskokoelman suosituksen 1200 ppm 12 % oppituntien ajasta. Noin neljänneksen oppituntien ajasta hiilidioksidipitoisuus pysytteli alle 750 ppm ja hieman yli puolet ajasta alle 900 ppm, jotka ovat sisäilmastoluokkien S1 ja S2 raja-arvoja. Viikolla 17 hiilidioksidipitoisuus oli hyvin samankaltainen kuin viikolla 9 keskimääräisen hiilidioksidipitoisuuden ollessa kuitenkin hieman korkeampi. Pääosin ilman laatu luokassa täytti rakentamismääräykset ja Sisäilmastoluokitus 2008:n vähimmäisvaatimukset koneellisen poiston käydessä täydellä teholla.

Tilakohtaisen ilmastointikoneen käydessä tarpeenmukaisella ohjauksella ison ilmavirran asetusarvon ollessa 180 dm³/s hiilidioksidipitoisuus ylitti 16 % oppituntien ajasta 1200 ppm. Tarpeenmukaisen ohjauksen ison ilmavirran asetusarvon ollessa 200 dm³/s hiilidioksidipitoisuus ei ylittänyt 1200 ppm:ää kertaakaan, kuten ei myöskään ilmastointikoneen käydessä vakioilmavirralla 140 dm³/s. Toimi- ja opetustiloissa olosuhteiden pysy-

vyys tulisi Sisäilmastoluokitus 2008:n mukaan olla 90 % käyttöajasta alle 900 ppm sisäilmastoluokassa S2 ja 95 % käyttöajasta alle 750 ppm luokassa S1. Kumpikaan näistä vaatimuksista ilman laadun osalta ei täyty. Tarpeenmukaisen ohjauksen ison ilmamäärän asetusarvon ollessa 200 dm³/s hiilidioksidipitoisuus pysyi kuitenkin melko alhaisella tasolla ja 97 % ajasta se oli alle 1000 ppm. Vakioilmavirralla 140 dm³/s hiilidioksidipitoisuus oli alle 1000 ppm 83 % oppituntien ajasta.

Kuvassa 39 on esitetty luokan 4 hiilidioksidipitoisuus poistoilmassa ja CAC-anturin mittaustulos tilakohtaisen ilmastointikoneen ollessa tarpeenmukaisella ohjauksella maksimi-ilmavirralla 180 dm³/s. Kuvan y-akselit on valittu siten, että vasemmalla on hiilidioksidipitoisuus ja oikealla valmistajan mukaan tätä hiilidioksidipitoisuutta vastaava CAC-anturin lukema. Kuvasta 39 nähdään, että CAC-anturin mittaustulos ei etenäkään maanantaina 6.2. vastannut poistoilman hiilidioksidipitoisuutta valmistajan käyrän mukaisella tavalla.



Kuva 39. Luokan 4 CO₂-pitoisuus, ilmamäärä ja CAC-anturin mittaustulos esitettynä samassa kuvassa 6.-10.2. tilakohtaisen ilmastointikoneen tarpeenmukaisen ohjauksen maksimi-ilmavirran ollessa 180 dm³/s.

Hiilidioksidipitoisuus pääsi kolmena oppituntina kohoamaan yli 1100 ppm maksimiarvon ollessa peräti yli 1300 ppm. Valmistajan mukaan 40 % CAC-mittarin lukema vastaa

1100 ppm hiilidioksidipitoisuutta. Tilakohtaisen ilmastointikoneen tarpeenmukainen ohjaus toteutettiin tämän tiedon perusteella siten, että CAC-arvon noustessa yli 40 % ilmastointikoneen automatiikka ohjaisi tulo- ja poistoilmapuhaltimia portaattomasti suuremmalle ilmavirralle, kunnes 40 % CAC-arvo jälleen alitettaisiin, tai saavutettaisiin maksimi-ilmavirta. Näin ollen hiilidioksidipitoisuuden ei missään tilanteessa pitäisi nousta kovin paljon yli 1100 ppm:n, jos maksimi-ilmavirta vain on asetettu riittävän suureksi huomioiden luokan hiilidioksidintuotto, eli käytännössä henkilömäärä.

CAC-anturi mittasi välillä liian pieniä CAC-pitoisuuksia luokan hiilidioksidipitoisuuteen nähden. Kun luokan hiilidioksidipitoisuus oli suurimmillaan noin 1350 ppm, CAC-anturin mittaustulos oli 33 %, mikä valmistajan käyrän mukaan vastaisi alle 1000 ppm hiilidioksidipitoisuutta. CAC-anturin liian pieni mittaustulos hiilidioksidipitoisuuteen nähden aiheutti sen, ettei koneen automatiikka antanut tulo- ja poistopuhaltimelle viestiä ilmavirran kasvattamisesta, ja hiilidioksidipitoisuus pääsi edelleen kasvamaan. Myös viikolla 7 kun ilmastointikoneen tarpeenmukaisen ohjauksen maksimi-ilmavirta oli 200 dm³/s, mittasi CAC-anturi välillä liian pieniä lukemia hiilidioksidipitoisuuteen nähden. Suurimmaksi osaksi CAC-anturin mittaustulos kuitenkin mukaili hiilidioksidipitoisuutta valmistajan käyrän mukaisesti.

6.5.5 Luokka 4: Hiilidioksidin kerrostuminen

Taulukossa 26 on esitetty hiilidioksidipitoisuuden keskiarvot eri korkeuksilla oppituntien aikana. Seurantamittaukset kestivät kullakin ilmanvaihtojärjestelmällä maanantaista perjantaihin. Taulukosta nähdään, että lämpötilan kerrostuminen oli hyvin vähäistä. Riippumatta siitä, oliko kyseessä tilakohtainen ilmastointikone vai koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä, olivat hiilidioksidipitoisuuden erot eri korkeuksien välillä samaa suuruusluokkaa. Näin ollen voidaan tehdä johtopäätös, että syrjäyttävälle ilmanjaolle ominaista epäpuhtauksien kerrostumista ei tapahtunut ainakaan mitattujen korkeuksien välillä.

Luokassa saattaa olla kerrostumista häiritseviä ilmavirtauksia, sillä vaikka oppilaat pääosin tunnin aikana istuvatkin, tapahtuu luokassa myös jatkuvasti liikkumista paikasta toiseen. Toinen todennäköinen syy sille ettei kerrostumista tapahdu on se, että ilmastointikoneen ilmamäärät ovat melko pieniä. Jos syrjäyttävässä ilmanjaossa haluttaisiin epäpuhtauksien kerrostumiskorkeudeksi noin 1,3 metriä, tulisi tilaan tuoda noin 20

dm³/s ilmaa henkilöä kohden [21]. 23 henkilön luokassa 1,3 metrin kerrostumiskorkeus vaatisi siis noin 460 dm³/s tuloilmavirtaa. Tutkimuksessa käytetyillä tilakohtaisen ilmastointikoneen ilmamäärillä epäpuhtauksien kerrostumiskorkeus on tätä alempana.

Vaikka hiilidioksidin kerrostumista ei juuri tapahtunut mitattujen korkeuksien välillä, ovat CO₂-pitoisuudet oleskelualueella alhaisia käytettäessä tilakohtaista ilmastointikonetta. Lisäksi kun käytetään syrjäyttävää ilmanjakomenetelmää, tuloilma leviää lattiaa pitkin ja nousee hengitysvyöhykkeelle oppilaiden aiheuttamien konvektiovirtausten vuoksi. Näin ollen oppilaiden työskennellessä paikallaan voi hengitysilman pitoisuus olla vielä alhaisempi, kuin mitattu oleskelualueen pitoisuus.

Taulukko 26. Hiilidioksidipitoisuuden keskiarvot eri korkeuksilta mitattuna eri ilmanvaihtojärjestelmillä

Järjestelmä	CO ₂ , ka [ppm]		
	1,1 m	1,7 m	2,4 m
Koneellinen poistoilmanvaihto			
Täysi teho viikko 17	949	998	1021
Tilakohtainen ilmastointikone			
Tarpeenmukainen ohjaus max. 180 dm ³ /s	922	963	X
Tarpeenmukainen ohjaus max. 200 dm ³ /s	732	777	X
Vakioilmavirta 140 dm ³ /s	786	810	814
(X = mittari antoi virheellisiä lukemia, ei huomioitu mittaustulosten käsittelyssä)			

6.5.6 Luokka 4: Paine-ero ulkovaipan yli

Taulukossa 27 on esitetty luokan 4 ja ulkoilman välisen paine-eron keskiarvo viikon pituisista seurantamittauksista. Paine-ero on esitetty sekä ilmastointilaitoksen ollessa käynnissä että sen ollessa pois päältä. Taulukosta nähdään, että luokan alipaineisuus ulkoilmaan nähden oli pienempi käytettäessä tilakohtaista ilmastointikonetta, kuin käytettäessä koneellista poistoilmanvaihtojärjestelmää.

Luokan alipaineisuus käytettäessä tilakohtaista ilmastointikonetta väheni keskimäärin noin 68 % verrattuna koneelliseen poistoilmanvaihtojärjestelmään, joka käy täydellä teholla. Kun tilakohtaista ilmastointikonetta verrataan koneelliseen poistoilmanvaihtojärjestelmään, joka käy puoliteholla, väheni alipaineisuus noin 32 %. Edellä mainituissa laskelmissa on laskettu kaikkien järjestelmien keskimääräinen paine-ero ulkoilmaan nähden siten, että on huomioitu myös keskimääräinen paine-ero mittausjaksolla, kun ilmastointilaitos ei ollut käynnissä.

Tilakohtaisen ilmastointikoneen käyttäminen luokassa ei poista alipaineisuutta kokonaan, sillä koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä on edelleen käytössä osassa koulun tiloja, kuten käytävillä. Muita tiloja palveleva koneellinen poistoilmanvaihto aiheuttaa tilakohtaisen ilmastointikoneen palvelemaan luokkaan edelleen alipaineen suhteessa ulkoilmaan. Asia voitaisiin mahdollisesti korjata säätämällä tuloilmavirta poistoilmavirtaa suuremmaksi. Tällöin tulisi myös mitata ja seurata, miten tilan paineisuus suhteessa ulkoilmaan muuttuu.

Taulukko 27. Luokan 4 keskimääräinen paine-ero ulkoilmaan nähden eri ilmanvaihtojärjestelmillä ilmastointilaitoksen ollessa käynnissä (klo 06-16) ja pois päältä (klo 16-06)

Järjestelmä	Paine-ero ka [Pa]	
	klo 06-16	klo 16-06
Koneellinen poistoilmanvaihto		
Täysi teho viikko 17	-14,0	-2,7
Täysi teho viikko 09	-13,0	-3,1
Puoli teho	-11,5	-6,5
Tilakohtainen ilmastointikone		
Tarpeenmukainen ohjaus max. 180 dm³/s	-7,3	-4,1
Tarpeenmukainen ohjaus max. 200 dm³/s	-7,7	-4,4
Vakioilmavirta 140 dm³/s	-6,5	-2,8

6.5.7 Luokka 4: Ilman nopeudet ja äänitaso

Luokassa mitattiin ilman nopeuksia 7 eri pisteestä kun tilakohtainen ilmastointikone oli käynnissä. Mittaustuloksena saatiin 3 minuutin keskiarvo mittauspisteen nopeudesta sekä ilman lämpötilasta. Lisäksi saatiin ilman nopeuden maksimi- ja minimiarvot sekä keskihajonta mittausaikana. Savukokeen avulla selvitettiin ilman liike luokassa ennen kuin mittaukset suoritettiin. Ilman nopeus oli suurimmillaan ilmastointikoneen lähistöllä lattian rajassa, kuten syrjäyttävässä ilmanjakotavassa voitiin olettaakin. Mittauspisteet on esitetty kuvassa 13 (s. 58).

Ilman nopeus mitattiin 0,5; 1,0 ja 3,0 metrin etäisyydeltä ilmastointilaitteen edestä ja sivulta. Tuloilman puhalluskuvio oli suunnattu eteen ja sivulle. Lisäksi ilman nopeus mitattiin keskeltä oleskelualueelta. Mittauspisteet sijaitsivat 5 cm korkeudella lattiasta, sillä syrjäyttävässä ilmanjaossa korkeimmat nopeudet esiintyvät tavallisesti 2-5 cm korkeudella lattian rajasta [21]. Ilman nopeudet mitattiin 200 dm³/s tuloilmavirralla siten, että

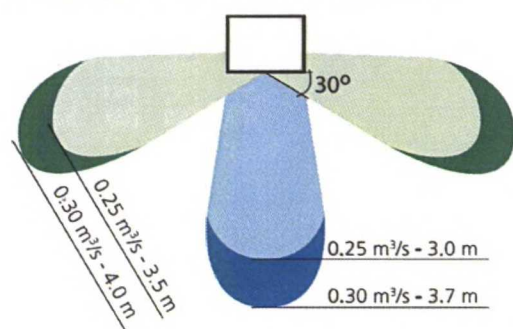
oppilaat olivat luokassa, sekä luokan ollessa tyhjiällä. Lisäksi nopeudet mitattiin 140 dm³/s tuloilmavirralla oppilaiden ollessa luokassa. Tuloilman lämpötilana käytettiin 18 °C.

Oleskelualueen keskellä sijaitsevassa mittauspisteessä ilman keskinopeus oli 0,060-0,1 m/s ja ilman lämpötilan keskiarvo 18,4-19,5 °C. Vedon vuoksi epätyytyväisten osuus tässä mittauspisteessä vaihteli 3,3-10 % välillä. Oleskelualueella vectoriski oli siis lähes olematon, kun vielä huomioidaan, että suurimmat nopeudet esiintyvät nilkkojen korkeudella. Nilkat eivät ole yhtä herkkiä vedolle kuin esimerkiksi niskan alue. Nilkoille voidaankin sallia niskaan verrattuna 1,5-kertainen ilman keskinopeus turbulenttisessa ilmavirtauksessa [3].

Ilman keskinopeudet, jotka mitattiin pisteistä 1-3 ja 5-7, ylittivät lähes kaikissa tilanteissa rakentamismääräyskokoelman osan D2 ja sisäilmaluokan S3 maksiminopeuden, joka on talvella 0,2 m/s. Huomioiden vielä ilman nopeuden vaihtelu ja ilman alhainen lämpötila (pääosin alle 19 °C), on lattian rajassa näillä etäisyyksillä vedon vaara. Vedon vuoksi epätyytyväisten osuus oli mittauspisteissä 1-3 ja 5-7 mittaustilanteesta riippuen 13,9-43,5 % välillä. Nämä mittauspisteet sijaitsevat ilmastointikoneen lähivyöhykkeellä. Lähivyöhykkeellä tarkoitetaan aluetta, jonka sisällä ilman nopeudet saattavat ylittää 0,2 m/s.

Valmistaja ilmoittaa lähivyöhykkeeksi 2 °C alilämpöisellä ilmalla ja 250 dm³/s ilmavirralla 3 m eteenpäin suunnatulle ilmavirralle ja 3,5 m sivulle päin suunnatulle ilmavirralle (kuva 40) [44]. Näin ollen korkeampia nopeuksia mittauspisteissä 1-3 ja 5-7 oli odotettavissakin, ja juuri tästä syystä on tärkeää suunnata tuloilmavirta siten, ettei se puhalta suoraan oleskelualueelle. On huomioitava myös se seikka, että korkeat nopeudet ilmenivät nilkkojen, eikä niskan korkeudella, jolloin voidaan sallia noin 1,5-kertaisia ilman nopeuksia niskan alueeseen verrattuna [3].

Lähivyöhyke 2 °C alilämpöisellä tuloilmalla



Vihreä alue: Lähivyöhyke, kun suuttimet on suunnattu sivuille (tehdasasetus).

Sininen alue: Lähivyöhyke, kun suuttimet on suunnattu eteenpäin.

Kuva 40. Lähivyöhyke ilmastointikoneelle valmistajan esitteen mukaisesti 2 °C alilämpöisellä tuloilmalla [44]

Ilman nopeudet mitattiin luokasta myös koneellisen poistoilmanvaihdon käydessä täydellä teholla, poistoilmavirran ollessa 53 dm³/s. Vedon kannalta riskialttiimmat paikat selvitettiin savukokeen avulla, jonka jälkeen suoritettiin ilman nopeusmittaukset. Koneellisen poistojärjestelmän käydessä täydellä teholla ei mittausten mukaan aiheutunut missään mittauspisteessä vedon riskiä, vaan ilman keskinopeudet pysyivät hyvin alhaisina. Keskinopeudet vaihtelivat välillä 0,019-0,071 m/s. Ulkolämpötila oli mittauksia suoritettaessa noin +7 °C. Talven kylmimpinä ilmoina vedon mahdollisuus koneellisessa poistoilmajärjestelmässä kasvaa, kun selvästi sisäilmaa kylmempää ulkoilmaa pääsee virtaamaan korvausilmaventtiileistä luokkatilaan. Nyt vedon riskiä ei kuitenkaan havaittu.

Ilmastointikoneen ollessa käynnissä mitattiin myös äänitaso eri ilmavirroilla. Ilmavirralla 200 dm³/s 1 minuutin ajan mitattuna äänitaso oli keskimäärin 33,6 dB mittauspisteessä 1 ja 34,8 dB mittauspisteessä 4. Ilmavirralla 140 dm³/s ilmastointikoneen äänitaso oli 30 dB mittauspisteessä 1 ja 29,9 dB mittauspisteessä 4. Jotta voitaisiin laskea myös taustamelun huomioiva ilmastointikoneen aiheuttama äänitaso, mitattiin taustamelutaso ilmastointikoneen ollessa pois päältä. Mittauspisteestä 1 saatiin taustamelutasoksi 26,6 dB ja mittauspisteestä 4 puolestaan 27,9 dB. Taustamelukorjatut äänitasot eri ilmavirroilla on esitetty taulukossa 28. Mittauspisteet on esitetty kuvassa 13 (s. 58).

Taustamelukorjattu ilmastointikoneen aiheuttama äänitaso saadaan seuraavasti [45]:

$$L_{p,1} = 10\lg(10^{\frac{L_{p,tot}}{10}} - 10^{\frac{L_{p,2}}{10}}) \tag{15}$$

$L_{p,1}$ on tutkittava äänitaso [dB]

$L_{p,tot}$ on kokonaisäänitaso [dB]

$L_{p,2}$ on taustamelu [dB].

Taulukko 28. Taustamelukorjatut äänitasot ilmavirralla 200 dm³/s ja 140 dm³/s

Mittauspiste	Taustamelukorjattu äänitaso 200 dm³/s ilmavirralla [dB]	Taustamelukorjattu äänitaso 140 dm³/s ilmavirralla [dB]
1	32,6	27,3
4	33,8	25,6

Sisäilmastoluokitus 2008:n ja rakentamismääräyskokoelman osan D2 mukaan LVIS-laitteiden A-painotettu äänitason $L_{A,eq}$ tulee olla pienempi kuin 33 dB. Taulukosta 28 nähdään, että mittauspisteessä 4 tämä äänitasovaatimus ylittyy hieman ilmamäärän ollessa 200 dm³/s. Muissa mittauspisteissä vaatimus alitetaan, 140 dm³/s ilmamäärällä 33 dB alittuu selkeästi. Voidaan todeta, ettei ilmastointikoneen luokkaan aiheuttama äänitaso ole liian korkea ja varsinkin pienemmällä ilmavirralla kone on hyvin hiljainen.

6.5.8 Luokka 4: Ilmanvaihdon tehokkuus

Taulukossa 29 on esitetty ilmanvaihdon tehokkuuden indeksejä eri järjestelmillä. Indeksit on laskettu kaavoilla (5) - (11). Epäpuhtauksien poistotehokkuus ε_c voitiin laskea sekä tilakohtaiselle ilmastointikoneelle että koneelliselle poistoilmanvaihtojärjestelmälle. Lämpötilahyötysuhde ε_t laskettiin vain tilakohtaiselle ilmastointikoneelle, sillä koneellisessa poistoilmanvaihdossa tilaan ei tuoda koneellisesti tuloilmaa. Ilman laatuun tyytyväisyyden osuus PD_{AQ} voitiin laskea kaikille järjestelmille, samoin ilman laatua kuvaava indeksi N_c . Luokasta mitattiin ilman nopeudet ja pintojen lämpötilat ainoastaan koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä viikolla 17 ja tilakohtaisen ilmastointikoneen käydessä vakioilmavirralla 140 dm³/s. Tästä syystä vain näille ratkaisuille on voitu laskea PMV ja PPD standardin ISO 7730 avulla [4]. Lämpötilaolosuhteita kuvaava in-

deksi N_t ja sekä ilman laadun että lämpötilaolosuhteet huomioiva ilmanjakoindeksi ADI voitiin laskea vain tilakohtaiselle ilmastointikoneelle vakioilmavirralla 140 dm³/s.

Taulukko 29. Ilmanvaihdon tehokkuuden indeksit eri järjestelmillä

Järjestelmä	ϵ_c [%]	ϵ_t [%]	PD_{AQ} [%]	PPD [%]	N_c	N_t	ADI
Koneellinen poistoilmanvaihto							
Täysi teho viikko 17	106	-	41,4	5	2,6	-	-
Tilakohtainen ilmastointikone							
Tarpeenmukainen ohjaus max. 180 dm ³ /s	87	85	28,6	-	3,1	-	-
Tarpeenmukainen ohjaus max. 200 dm ³ /s	102	82	28	-	3,8	-	-
Vakioilmavirta 140 dm ³ /s	101	89	22,3	5,2	4,5	17,1	4,7

Epäpuhtauksien poistotehokkuus koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä oli keskimäärin hieman korkeampi kuin tilakohtaista ilmastointikonetta käytettäessä. Epäpuhtauksien poistotehokkuus oli kuitenkin kaikissa ilmanvaihtojärjestelmissä samaa suuruusluokkaa vaihdellen 87-106 % välillä.

Täysin sekoittuneessa huoneilmassa epäpuhtauksien poistotehokkuus on 100 %. Syrjäyttävässä ilmanjaossa, jossa tuloilma tuodaan suoraan oleskelualueelle ja poistetaan katosta, saattaa epäpuhtauksien poistotehokkuus joskus olla hyvinkin korkea, joidenkin tutkimuksien mukaan jopa 180 % [25, 28]. Nyt epäpuhtauksien poistotehokkuus oli kuitenkin lähempänä Awbin ja Karimapanahin ym. saamia tuloksia, joissa epäpuhtauksien poistotehokkuus vaihteli noin 90-105 % välillä [23, 27].

Lämpötilahyötysuhde vaihteli tilakohtaista ilmastointikonetta käytettäessä välillä 82-89 %. Täysin sekoittuneessa huoneilmassa lämpötilahyötysuhde on 100 %. Syrjäyttävässä ilmanjaossa lämpötilahyötysuhde voi olla tätä paljon korkeampi, sillä jos syrjäyttävän ilmanjaon periaatteet toteutuvat, on tilan yläosasta poistettava ilma oleskelualueen ilmaa lämpimämpää. Lämpötila oleskelualueella oli nyt keskimäärin hieman korkeampi kuin lämpötila poistoilmassa.

Lämpötilahyötysuhde syrjäyttävässä ilmanjaossa eri tutkimusten tuloksien valossa vaihtelee paljon riippuen koeolosuhteista. Esimerkiksi Karimippanahin ym. tutkimuksessa syrjäyttävän ilmanjaon lämpötilahyötysuhteelle saatiin arvoja 58,4-156,2 % riippuen käytetystä ilmamäärästä, tuloilman lämpötilasta ja tuloilmalaitteiden lukumäärästä. Awbin tutkimuksessa syrjäyttävälle ilmanjaolle saatiin lämpötilahyötysuhteeksi jopa yli 280 % [23, 27].

Ilman laatuun tyytymättömien osuus PD_{AQ} oli koneellisella poistoilmanvaihtojärjestelmällä suurin, 41,4 %. Kuitenkin myös tilakohtaisessa tarpeenmukaisessa ilmanvaihdossa ilman laatuun tyytymättömien osuus oli korkea, lähes 30 %. Keskimäärin henkilökohden tarpeenmukaisessa ilmanvaihdossa ilmamäärät olivat 4,4 dm³/s ja 4,7 dm³/s, mikä selittää korkean tyytymättömien osuuden. Myös tilakohtaisen ilmastointikoneen käydessä vakioilmavirralla ilman laatuun tyytymättömien osuus oli yli 20 %. Ilmamäärä henkilökohden oli tällöin noin 6,1 dm³/s.

Ilman laatua kuvaava indeksi N_c vaihteli tilakohtaista ilmastointikonetta käytettäessä 2,6-4,5 välillä ollen korkein vakioilmavirralla 140 dm³/s ja matalin koneellisella poistoilmanvaihtojärjestelmällä. Karimipannahin ym. tutkimuksessa N_c vaihteli välillä 3,6-7,8 syrjäyttävässä ilmanjaossa ja Jurelionisin tutkimuksessa N_c sai arvon 7,45 [25, 27].

Johtuen matalasta ilman nopeudesta keskellä oleskelualueetta, sekä koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä että tilakohtaisen ilmastointikoneen vakioilmavirtaohjauksessa lämpöolosuhteisiin tyytymättömien osuus PPD oli hyvin matala, vain noin 5 %. PMV laskettuna ISO 7730-standardin mukaisesti sai koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä arvon 0 ja tilakohtaisella ilmastointikoneella arvon -0,1 [4].

Laskennassa käytettiin aineenvaihdunnan tehona 1,2 met (70 W/m²), joka vastaa koulutyötä ja vaatetuksena 1 clo eli 0,155 m²/WK eli normaalia sisävaatetusta. Keskimääräinen säteilylämpötila kummallekin ilmanvaihtojärjestelmille laskettiin oleskelualueen keskelle, saaden keskimääräiseksi säteilylämpötilaksi koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä $t_s = 21,2$ °C ja tilakohtaiselle ilmastointikoneelle $t_s = 20,2$ °C.

Hyvin alhaisen PPD -arvon vuoksi tilakohtaista ilmastointikonetta käytettäessä lämpöolosuhteita kuvaava indeksi N_t sai melko korkean arvon 17,1. Ilmastointikoneen lähi-vyöhykkeellä PPD olisi saanut korkeampia arvoja johtuen suuremmista ilman nopeuksista, ja N_t olisi ollut alhaisempi. Karimipannahin ym. tutkimuksessa N_t vaihteli välillä 8,9-19,9 syrjäyttävässä ilmanjaossa ja Jurelionisin tutkimuksessa N_c sai arvon 12,7 [25, 27].

Ilmanjakoindeksiksi ADI saatiin 4,7 tilakohtaista ilmastointikonetta vakioilmavirralla käytettäessä. Karimipannahin ym. tutkimuksessa ADI vaihteli välillä 3,9-9,8 syrjäyttävässä ilmanjaossa ja Jurelionisin tutkimuksessa ADI sai arvon 9,74 [25, 27]. Melko kor-

kea ilman laatuun tyytymättömien osuus laskee ilman laatua kuvaavaa indeksiä N_c ja näin ollen myös ilmanjakoindeksiä ADI .

6.5.9 Luokka 5: Ilmamäärät

Taulukossa 30 on esitetty luokan 5 ilmamäärät eri ilmanvaihtojärjestelmillä. Tilakohtaisen ilmastointikoneen kohdalla on ilmoitettu keskimääräinen ilmamäärä oppituntien aikana, sillä ilmastointikone oli asetettu tarpeenmukaiselle ohjaukselle. Luokan henkilömääränä on käytetty 17 henkilöä, pinta-alana 63 m² ja tilavuutena 189 m³.

Taulukko 30. Luokan 5 ilmamäärät eri ilmanvaihtojärjestelmillä

Järjestelmä	q _v [dm ³ /s]	q _v [(dm ³ /s)/hlö]	q _v [(dm ³ /s)/m ²]	n [1/h]
Koneellinen poistoilmanvaihto				
Täysi teho	67,8	4,0	1,1	1,3
Puoli teho	33,3	2,0	0,5	0,6
Tilakohtainen ilmastointikone				
Tarpeenmukainen ohjaus max. 160 dm ³ /s	95	5,6	1,5	1,8

Vaikka luokan oppilasmäärä on tavallista pienempi, ei poistoilmamäärä henkilöä kohden silti täytä rakentamismääräysten tai Sisäilmastoluokitus 2008 luokan S3 vaatimusta 6 dm³/s. Tilakohtaista ilmastointikonetta käytettäessä tarpeenmukaisella ohjauksella on keskimääräinen ilmavirta henkilöä kohden hieman alle määräystenmukaisen arvon.

6.5.10 Luokka 5: Lämpötila

Luokan 5 lämpötila 1,1 metrin korkeudella vaihteli 19,6-21,3 °C välillä, kun koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä kävi puolella teholla 13.-17.2. Keskiarvo lämpötilalla oli 20,4 °C. Lämpötila alitti 20 °C 14 % oppituntien ajasta. Lämpötilaa luokassa oli hieman liian alhainen, kuitenkin pääosin rakentamismääräyskokoelman D2 ja Sisäilmastoluokitus 2008 S3-luokan lämpötilavaatimus 20-22 °C täyttyi. S2-luokan vaatimus lämpötilan pysyvyydelle 90 % ajasta välillä 20,5-22,5 °C ei täyttynyt. Ulkolämpötila vaihteli kyseisellä ajanjaksolla välillä -2...-9 °C.

Koneellinen poistojärjestelmä kävi täydellä teholla 27.2.-2.3. Ulkolämpötila vaihteli tällä ajanjaksolla välillä -6...+4 °C ja sisälämpötila välillä 19,9-21,2 °C keskiarvon ollessa 20,6 °C. Oppituntien ajasta noin 4 % lämpötila alitti 20 °C ja 20,5 °C alittui noin 27 % ajasta. Näin ollen S2-luokan vaatimukset lämpötilan pysyvyydestä eivät täyttyneet. Kui-

tenkin rakentamismääräyskokoelman D2 ja sisäilmastoluokan S3 vaatimukset täyttyivät.

Tilakohtaisen ilmastointikoneen käydessä tarpeenmukaisella ohjauksella 9.-13.1. sisälämpötila vaihteli välillä 19,9-21,3 °C ulkolämpötilan vaihdellessa välillä -6...+3 °C. 20,5 °C alittui 10 % oppituntien ajasta. S2-luokan vaatimukset lämpötilan pysyvyydestä täyttyivät pääosin, mutta lämpötila ei tässä sisäilmastoluokassa saisi alittaa 20 °C:ta. Kuitenkin kun huomioidaan mittarin epätarkkuus $\pm 0,5$ °C ja alin lämpötila 19,9 °C voidaan katsoa S2-luokan vaatimukset pääosin täytyviksi. Rakentamismääräyskokoelman D2 ja sisäilmastoluokan S3 vaatimukset lämpötilasta täyttyivät.

6.5.11 Luokka 5: Hiilidioksidipitoisuus

Taulukossa 31 on esitetty luokan 5 hiilidioksidipitoisuuksien keskiarvot ja maksimi-arvot eri ilmanvaihtojärjestelmillä oppituntien aikana viikon seurantamittausten perusteella. Lisäksi taulukossa on verrattu hiilidioksidipitoisuuden pysyvyyttä rakentamismääräyskokoelman osan D2 ja Sisäilmastoluokitus 2008:n sisäilmastoluokkien S1-S3 hiilidioksidipitoisuuden enimmäisarvoihin [1, 2].

Taulukko 31. Luokka 5 hiilidioksidipitoisuuksien keskiarvo oppituntien aikana viikon seurantamittauksina maksimiarvoineen, sekä olosuhteiden pysyvyyden vertailu määräyksien ja ohjeiden raja-arvoihin

Järjestelmä	CO _{2, ka} [ppm]	CO _{2, max} [ppm]	Olosuhteiden pysyvyys [%]		S3, RakMk D2 < 1200 ppm
			S1 < 750 ppm	S2 < 900 ppm	
Koneellinen poistoilmanvaihto					
Täysi teho	732	1208	44	77	99
Puoli teho	948	1741	17	40	82
Tilakohtainen ilmastointikone					
Tarpeenmukainen ohjaus max. 160 dm ³ /s	701	1482	61	92	98

Taulukosta 31 nähdään, että koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä puolella teholla hiilidioksidipitoisuus kohosi oppituntien aikana enimmillään jopa yli 1700 ppm:n. Rakentamismääräyskokoelman D2 ja S3-luokan enimmäisvaatimus 1200 ppm ylittyi 18 % oppituntien ajasta. Koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käyttäminen puolella teholla, joka tässä tapauksessa vastaa 2,0 dm³/s ilmamäärää henkilöä kohden, ei riittänyt saavuttamaan määräystenmukaista ilman laatua koululuokassa.

Koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä täydellä teholla ilmamäärä henkilöä kohden oli noin 4,0 dm³/s. Rakentamismääräyskokoelman enimmäisvaatimusta 1200 ppm ei käytännössä ylitetty oppituntien aikana ja 1000 ppm ylittyi ainoastaan 5 % oppituntien ajasta. Näin ollen rakentamismääräyskokoelman D2 ja S3-luokan ilman laatuvaatimukset täyttyivät luokassa. Tässä mittauksessa on kuitenkin huomioitava se, että luokan opettaja ilmoitti käyttäneensä ikkunatuuletusta ajoittain kun luokan ilma oli tuntunut raskaalta.

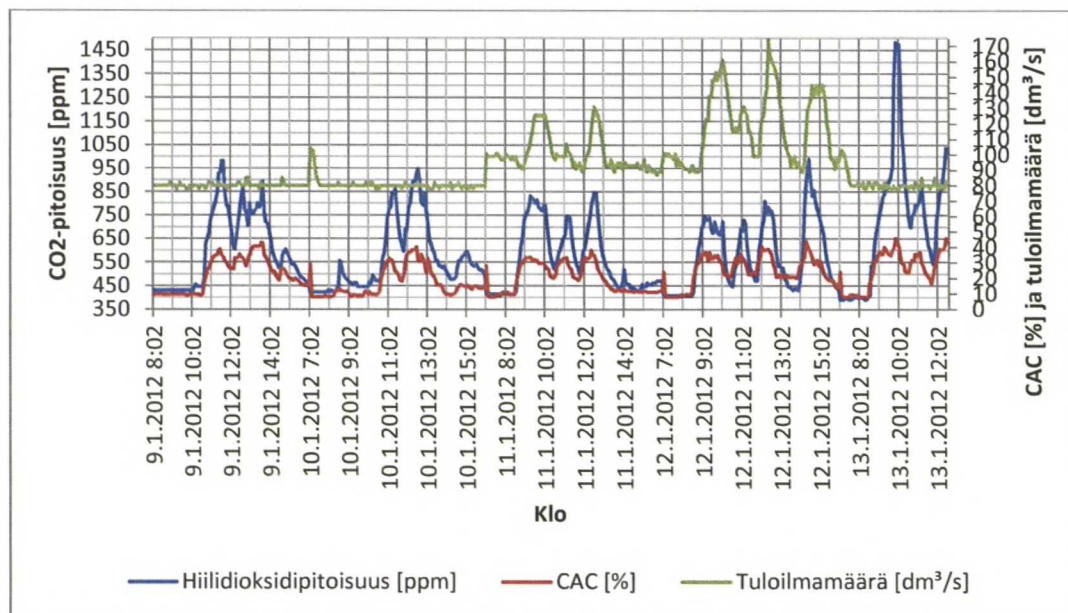
Tilakohtaisen ilmastointikoneen käydessä tarpeenmukaisella ohjauksella, oli keskimääräinen ilmamäärä henkilöä kohden noin 5,6 dm³/s. Hiilidioksidipitoisuus ylitti S2-luokan enimmäisvaatimuksen 8 % oppituntien ajasta. Ilman laadun perusteella luokan sisäilma täytti S2-luokan luokan vaatimuksen, jonka mukaan 90 % käyttöajasta on alitettava 900 ppm.

Luokan hiilidioksidipitoisuus kohosi ainoastaan yhden oppitunnin aikana yli 1200 ppm:n, jolloin pitoisuus oli enimmillään melkein 1500 ppm. Opettajan mukaan luokassa oli tällöin ilmaisutaidon tunti, ja oppilaat olivat erityisen riehakkaita. Ilmastointikoneessa oli tällöin ilmeisesti tekninen häiriö, sillä se ei reagoinut hiilidioksidipitoisuuden nousuun, vaan tuloilma oli minimiasetuksessaan, eli 80 dm³/s:ssa koko kyseisen koulupäivän ajan. Jos tarpeenmukainen ohjaus olisi reagoinut CAC-anturin kasvaneeseen mittaustulokseen ja kasvattanut tuloilmavirtaa, ei hiilidioksidipitoisuus olisi todennäköisesti päässyt kasvamaan näin suureksi.

Kuvassa 41 on esitetty luokan 5 hiilidioksidipitoisuus, CAC-anturin mittaustulos sekä ilmamäärä 9.-13.1. Ilmastointikoneen tarpeenmukainen ohjaus oli ohjelmoitu siten, että CAC-anturin mittaustuloksen ylittäessä 40 % ilmastointikone alkaa portaattomasti kasvattaa tuloilmavirtaa, kunnes saavutetaan maksimi-ilmavirta tai alitetaan CAC-anturin asetusarvo 40 %. Valmistajan käyrän mukaan 40 % CAC-anturin arvo vastaa 1100 ppm hiilidioksidipitoisuutta. Kuvasta nähdään, että CAC-anturin mittaustulos mukailee luokan hiilidioksidipitoisuutta, vaikka tässä mittauksessa hiilidioksidimittari ei sijainnutkaan poistoilma-aukossa, vaan oleskelualueella luokan etuosassa.

Kuvasta nähdään myös, ettei koneen CAC-anturin mittaustuloksen perusteella toimiva tarpeenmukainen ohjaus reagoinut johdonmukaisesti CAC-mittaukseen. Esimerkiksi 9. ja 10.1. tuloilmamäärä pysyttelee minimissään, eli noin 80 dm³/s:ssa CAC-anturin mit-

taustuloksen muuttuessa. Näin piti tässä tilanteessa ollakin, sillä CAC-anturi ei mitannut yli 40 % pitoisuuksia. Kuitenkin 11.-12.1. ilmastointikone alkaa kasvattamaan tuloilmamäärää, vaikka CAC-anturi mittaa hieman yli 30 % pitoisuuksia. Tämän lisäksi perjantaina 13.1. CAC-anturi mittaa lähes 45 % pitoisuuksia, mutta ei kasvata tuloilmamäärää, vaan pitää sen minimiarvossaan 80 dm³/s koko päivän ja hiilidioksidipitoisuus pääsee hetkellisesti kasvamaan liian suureksi.



Kuva 41. Luokan 5 hiilidioksidipitoisuus, CAC-anturin mittaustulos ja ilmamäärä 9.-13.1.

6.5.12 Luokka 5: Paine-ero ulkovaipan yli

Taulukossa 32 on esitetty luokan 5 keskimääräinen paine-ero ulkoilmaan nähden eri ilmanvaihtojärjestelmillä. Kuvassa on esitetty paine-ero silloin, kun koulun koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä oli käynnissä, sekä vertailun vuoksi myös sen ollessa pois päältä. Tilakohtainen ilmastointikone kytkeytyi oman aikaohjelmansa mukaan käyntiin arkaamuisin klo 07 ja pois päältä kello 16. Koulun koneellinen poistojärjestelmä puolestaan kytkeytyi päälle klo 06 ja pois päältä klo 16.

Luokan paine-ero ulkoilmaan kasvoi selkeästi aina silloin, kun koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä kytkeytyi päälle. Näin kävi silloinkin, kun luokan poistoilmaventtiilit oli kierretty kiinni tilakohtaisen ilmastointikoneen ollessa käytössä. Tilakohtaisen

ilmastointikoneen käynnistyessä klo 7 luokan paine-ero ulkoilmaan ei muuttunut vaan se pysyi samana, mille tasolle se oli noussut koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän kytkeytyessä päälle palvelemaan muita tiloja. Koneellisen poistojärjestelmän käydessä muissa tiloissa myös tilakohtaisten ilmastointikoneiden palvelualueelta virtaa korvaus-ilmaa koneellisen poiston palvelemille alueille, jolloin tilakohtaisten ilmastointikoneiden palvelualueiden alipaineisuus kasvaa hieman.

Paine-ero luokan ja ulkoilman välillä tilakohtaisen ilmastointikoneen ollessa käytössä oli keskimäärin 57 % pienempi kuin koneellisen poistoilmanvaihdon käydessä täydellä teholla ja 30 % pienempi kuin koneellisen poistoilmanvaihdon käydessä puoliteholla. Vertailussa huomioitiin keskimääräinen paine-ero luokan ja ulkoilman välillä silloin, kun ilmanvaihtolaitos ei ollut käynnissä. Paine-ero luokan ja ulkoilman välillä ei kuitenkaan ole tavattoman suuri silloinkaan, kun koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä käy täydellä teholla.

Taulukko 32. Luokan 5 keskimääräinen paine-ero ulkoilmaan nähden eri ilmanvaihtojärjestelmillä ilmastointilaitoksen ollessa käynnissä (klo 06-16) ja pois päältä (klo 16-06)

Järjestelmä	Paine-ero ka [Pa]	
	klo 06-16	klo 16-06
Koneellinen poistoilmanvaihto		
Täysi teho	-11,8	-2,7
Puoli teho	-12,2	-6,6
Tilakohtainen ilmastointikone		
Tarpeenmukainen ohjaus max. 160 dm³/s	-8,8	-4,9

6.6 Johtopäätökset mittauksista

Ilmamäärät olivat koneellista poistoilmanvaihtojärjestelmää käytettäessä kaikissa mittauksissa liian pieniä verratessa nyky määräysten mukaisiin ilmamääriin. Etenkin koneellisen poistoilmanvaihdon käydessä puolella teholla ilmamäärät alittivat rakentamismääräykset reilusti. Koneellista poistoilmanvaihtoa käytetään tavallisesti puoliteholla talven kylmimpinä kuukausina. Tällä pyritään estämään liiallinen kylmän ulkoilman kulkeutuminen luokkaan vedon välttämiseksi ja lämmitysenergian säästämiseksi.

Tilakohtaista ilmastointikonetta käytettäessä tarpeenmukaisella ilmanvaihdoilla keskimääräinen ilmamäärä henkilöä kohden mittausviikon aikana alitti rakentamismääräyk-

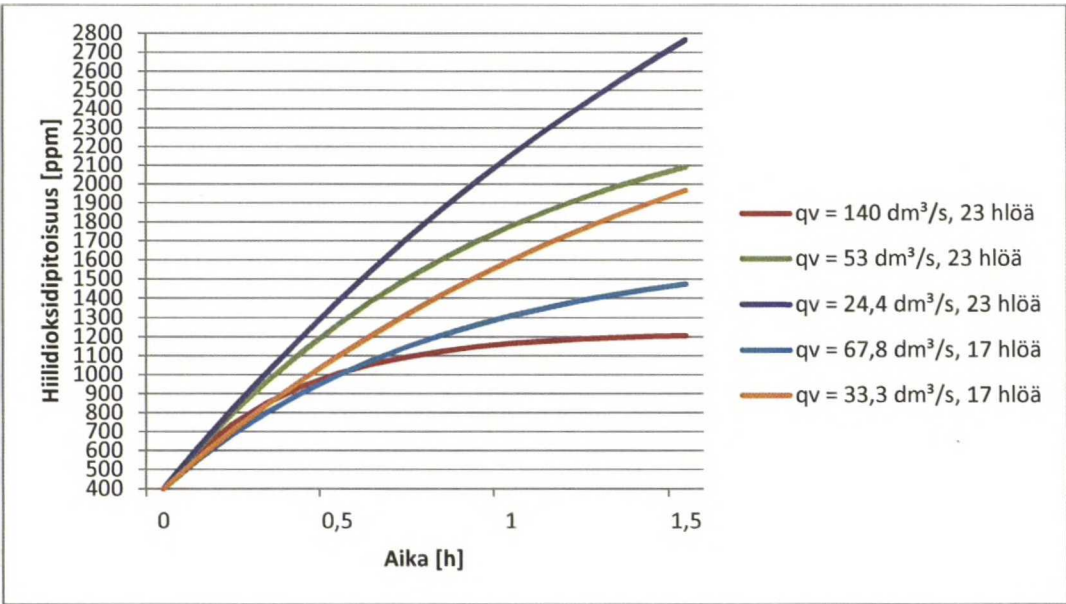
set. Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon tarkoitus on kuitenkin vakioilmavirran sijaan tuoda tilaan riittävä määrä ilmaa tilan olosuhteet huomioiden. Tarpeenmukaista ilmanvaihtoa voidaan ohjata esimerkiksi luokan epäpuhtauspitoisuuksien tai lämpötilan mukaan. Tilakohtaisella ilmastointikoneella voidaan luoda koululuokkaan määräystenmukaiset sisäilmasto-olosuhteet käytettäessä tarpeenmukaista ilmanvaihtoa, vaikka keskimääräinen ilmamäärä henkilöä kohden alittaisikin määräykset. On kuitenkin varmistuttava, että maksimi-ilmavirta-asetus on riittävän suuri.

Lämpötila luokassa ei muodostunut millään ilmanvaihtojärjestelmällä ongelmaksi, vaan kaikki ilmanvaihtojärjestelmät täyttivät rakentamismääräysten vähimmäisvaatimukset. Ainoastaan käytettäessä tilakohtaista ilmastointikoneetta tarpeenmukaisella ohjauksella maksimi-ilmamäärällä 180 dm³/s esiintyi hieman liian korkeita lämpötiloja huomioiden talviajankohta. Tämä saattoi johtua termostaattisten patteriventtiilien toimintahäiriöstä tai liian korkeasta patteriverkoston menoveden lämpötilasta, kyseisellä mittausviikolla oli kovia pakkasia. Lämpötilan mittauspisteet sijaitsivat ikkunaseinän vastakkaisella seinällä, joten ei ole tietoa, aiheuttiko koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä matalampia lämpötiloja ikkunaseinustan lähistöllä.

Hiilidioksidipitoisuudet koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän käydessä puoliteholla kohosivat kummassakin tutkimuksen kohteena olevassa luokassa korkealle, maksimipitoisuuksien ollessa noin 1700 ppm ja 2000 ppm luokasta riippuen. Asumisterveysoppaan mukaan hiilidioksidipitoisuuden ylittäessä 1500 ppm ilmanvaihto ei ole terveydensuojelulain edellyttämällä tasolla [46]. Jos koneellista poistoilmanvaihtojärjestelmää talvella käytetään puoliteholla, on varmistuttava siitä, etteivät hiilidioksidipitoisuudet pääse kohoamaan liian korkeiksi.

Koneellisen poistoilmanvaihdon käydessä täydellä teholla kummankin tutkitun luokan hiilidioksidipitoisuus pysyi keskimäärin melko alhaisella tasolla, joskin luokassa 4 jossa oli suurempi ryhmäkoko (22 oppilasta) hiilidioksidipitoisuus ylitti 1200 ppm yli 10 % ajasta. Myös tilakohtaisen ilmastointikoneen käydessä tarpeenmukaisella ohjauksella maksimi-ilmavirralla 180 dm³/s 1200 ppm ylittyi noin 15 % ajasta. Tämä johtui todennäköisimmin ilmastointikoneen tarpeenmukaisen anturin mittarista, joka mittasi liian alhaisia pitoisuuksia. Tilakohtaisen ilmastointikoneen käydessä tarpeenmukaisella ohjauksella maksimi-ilmavirralla 200 dm³/s ja vakioilmavirralla 140 dm³/s hiilidioksidipitoisuus ei kertaakaan ylittänyt 1200 ppm keskiarvonkin ollessa hyvin alhainen.

Ala-asteen oppitunnit ovat verrattain lyhyitä, noin 45 minuuttia, eikä hiilidioksidipitoisuus ollut saavuttanut monessa tapauksessa vielä tasapainotilan pitoisuutta. Esimerkiksi joissain lukioissa ja yläasteilla, saatetaan pitää kaksi oppituntia yhteen putkeen ilman taukoa välissä. Tällöin hiilidioksidipitoisuus voi oppitunnin lopussa olla paljon korkeampi, jos ilmanvaihto ei ole riittävää. Kuvassa 42 on esitetty hiilidioksidipitoisuus eri ilmamäärillä ajan funktiona laskettuna kaavalla (13). Taustapitoisuus on 400 ppm, luokan tilavuus 189 m³ ja yhden henkilön hiilidioksidintuotto 5 cm³/s. Tämä hiilidioksidin tuotto vastaa rauhallista istumista keskikokoisella ihmisellä, aineenvaihdunnan tehon ollessa 1 met [3].



Kuva 42. Hiilidioksidipitoisuuden kasvaminen ajan funktiona mittauksien mukaisilla ilmamäärillä ja vastaavien luokkien henkilömäärillä laskettuna 1,5 h ajanjaksolla

Kuvasta 42 nähdään, että ilmavirralla 140 dm³/s 23 henkilön luokassa 1,5 h yhtäjaksoisen oleskelun aikana hiilidioksidipitoisuus saavuttaisi lähes tasapainotilan pitoisuuden. Koneellisessa poistoilmanvaihdossa puolestaan hiilidioksidipitoisuus ei missään tapauksista ole lähellä tasapainotilan pitoisuutta. Jos oppitunti 45 minuutin sijasta kestäisi pidempään, kuten esimerkiksi 75 minuuttia, kasvaisivat hiilidioksidipitoisuudet koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä paljon mitattuja pitoisuuksia korkeammaksi. Ilmastointiratkaisujen erot korostuvat siis mitä pidempään tilassa yhtäjaksoisesti oleskel-

laan. Lyhyiden oppituntien aikana hiilidioksidipitoisuus ei koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä ehdi saavuttaa lähellekään tasapainotilanteen pitoisuutta.

Paine-erot ulkovaipan yli olivat selvästi suurempia koneellista poistoilmanvaihtojärjestelmää käytettäessä. Vaikka paine-erot eivät tällöinkään olleet tavattoman suuria, saattavat ne olla riittäviä rakenteissa aikaisempien tutkimusten mukaan havaittujen epäpuhtauksien kulkeutumiseen sisäilmaan. Kuitenkaan tilakohtaista ilmastointikoneetta käyttämällä paine-eroa ulkovaipan yli ei saatu riittävän alhaiseksi. Asumisterveysoppaan mukaan paine-ero ulkoilmaan tulisi olla noin 0...-2 Pa käytettäessä koneellista tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmää ja noin -5...-20 Pa käytettäessä koneellista poistojärjestelmää [46]. Jos tilakohtaisella ilmastointikoneella halutaan poistaa tilan alipaineisuus, olisi tuloilmavirta säädettävä poistoilmavirtaa suuremmaksi, ja mittaamalla paine-ero ulkovaipan yli varmistettava haluttu muutos painesuhteissa. Lisäksi koneellista poistoilmanvaihtojärjestelmää palvelevat poistoventtiilit muualla rakennuksessa tulisi säätää oikeansuuruisille ilmavirroille sen jälkeen, kun järjestelmästä on suljettu venttiilejä luo- kissa, joihin on lisätty tilakohtaiset ilmastointikoneet.

Ilman nopeudet olivat hyvin alhaisia koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä. Mittausajankohta oli kevät ja ulkolämpötila noin 7 °C, joten saattaa olla että ilman nopeudet ovat talvella kovilla pakkasilla suurempia aiheuttaen vedon riskin. Tilakohtaisella ilmastointikoneella ilman nopeus luokahuoneen keskiosalla oli hyvin alhainen, mutta mitattaessa ilmastointikoneen lähivyöhykkeeltä ilman nopeudet olivat keskimäärin niin korkeita, että ne hyvin todennäköisesti aiheuttavat vedon tunnetta. Tästä syystä onkin tärkeää suunnata ilmasuihku esimerkiksi seinien suuntaisesti ja välttää sijoittamasta oppilaiden pysyviä työskentelypisteitä ilmastointikoneen lähivyöhykkeelle.

Ilmastointikoneen äänitaso oli rakentamismääräysten mukainen mitattaessa sekä 200 dm³/s että 140 dm³/s ilmavirroilla. Tilakohtainen ilmastointikone soveltuu koululuokkaan matalan äänitason vuoksi hyvin. On kuitenkin huomioitava, että mittauksessa oli mukana vain yhden valmistajan laite, joten muiden laitevalmistajien ilmastointikoneita käytettäessä olisi varmistuttava, ettei ilmastointikoneen äänitaso ylitä rakentamismääräysten arvoja.

Epäpuhtauksien poistotehokkuus oli tilakohtaista ilmastointikoneetta käytettäessä lähellä tilannetta, jossa huoneilma on täydellisesti sekoittunutta. Lämpötilahyötysuhde oli kes-

kimäärin hieman tätä tilannetta matalampi. Se, ettei syrjäyttävälle ilmanjaolle mahdollista korkeampaa epäpuhtauksien poistotehokkuutta ja lämpötilatehokkuutta saavutettu, saattaa johtua siitä, että tilakohtaisen ilmastointikoneen poistoilma-aukko sijaitsee ilmastointikoneen yläosassa, eikä huoneen katossa. Toisaalta saadut arvot ilmanvaihdon indekseille eivät poikenneet merkittävästi joidenkin aiempien tutkimuksien tuloksista, vaan olivat samaa suuruusluokkaa.

Tässä tutkimuksessa suoritettujen mittausten perusteella voidaan todeta, että tilakohtainen ilmastointikone ei aikaansaanut syrjäyttävälle ilmanjaolle tyypillistä lämpötilan ja epäpuhtauksien kerrostumista, tai korkeampia ilmanvaihdon indeksejä. Tilakohtaisella ilmastointikoneella saatiin kuitenkin aikaan hyvät sisäilmasto-olosuhteet.

7 ILMANVAIHTOJÄRJESTELMIEN KUSTANNUSVERTAILU

7.1 Vertailun tavoitteet ja menetelmät

Tässä osiossa vertaillaan laskennallisia kustannuksia ja energiankulutusta koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän, keskitetyn tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän sekä tilakohtaisilla ilmastointikoneilla toteutetun ilmanvaihtojärjestelmän välillä koulurakennuksessa. Tavoitteena on selvittää, onko tilakohtaisten ilmastointikoneiden käyttäminen koulurakennusten sisäilmaston parantamiseen taloudellisesti ja energiankulutus huomioiden järkevää.

Vertailussa lasketaan kokonaiskustannukset kaikille järjestelmille 15, 20 ja 25 vuoden käyttöajoilla. Kokonaiskustannuksille lasketaan nykyarvo. Investointikustannuksissa ei huomioida keskitetyn järjestelmän mahdollisia lisäkustannuksia, jotka saattavat tulla kyseeseen silloin, kun rakenteita täytyy vahvistaa ilmanvaihtokonehuoneen osalta. Tällaiset kustannukset ovat hyvin tapauskohtaisia ja niistä on hyvin vaikeaa tehdä yleistäviä arvioita. Kustannusvertailussa tarkastelu tehdään ainoastaan luokkahuoneiden osalta. Usein liikuntasalilla ja ruokalalla on omat ilmanvaihtokoneensa, kuten myös tiloilla, kuten rappukäytävät ja wc-tilat, joita palvelee koneellinen poistopuhallin.

7.2 Elinkaarikustannusten laskeminen

7.2.1 Investointikustannukset

Koneellinen poistoilmanvaihto, joka oli koulun ilmanvaihtojärjestelmä luokissa ennen tilakohtaisten ilmastointikoneiden asentamista, ei aiheuta investointikustannuksia. Investointikustannukset liittyen koneelliseen poistoilmanvaihtoon tulisivat kyseeseen silloin, jos osa tai kaikki poistopuhallit päätettäisiin vaihtaa. Tässä tapauksessa suurin osa poistopuhallimista on vaihdettu uusiin vuonna 1998.

Tilakohtaisten ilmanvaihtokoneiden investointikustannukset syntyvät ilmastointikoneiden hinnasta, asentamiseen vaadittavasta työstä sekä asentamiseen tarvittavasta materiaalista, eli käytännössä ulko- ja jäteilmakanavista eristeineen sekä säätöpelleistä. HKR-

Rakennuttajalta saatiin tieto toteutuneista kokonaiskustannuksista yksittäistä ilmastointikonetta kohti. Tätä käytettiin yksikkökustannuksena tilakohtaisten ilmastointikoneiden investointikustannuksia laskettaessa.

Keskitettyssä ilmastointijärjestelmässä investointikustannuksiin sisältyvät ilmastointikoneen hankintahinta, ilmastointikonehuoneen arvioidut rakentamiskustannukset, ilmastointikoneen asentamiseen tarvittava työ ja materiaali sekä ilmastointikanavien ja pääte-laitteiden materiaali- ja asentamiskustannukset. Ilmastointikoneen asentamisesta aiheuu-tuu myös automaatiokustannuksia sekä lämmityspuolen kustannuksia, kun ilmastointi-koneen tuloilman lämmityspatterille on tuotava lämmityspotket. Investointikustannuk-siin kuuluvat lisäksi järjestelmän suunnittelusta aiheutuvat kustannukset.

Keskitetyn järjestelmän ilmastointikoneen hankintahinnalle saatiin arvio kyselemällä kahdelta eri laitevalmistajalta hintaa kohteeseen sopivalle koneelle. Hinta-arviot olivat hyvin lähellä toisiaan. Ilmastointikonehuoneen arvioidut rakentamiskustannukset lasket-tiin Talonrakennuksen kustannustieto 2011 -mukaisesti, samoin kuin arvio ilmastointi-kanavien ja -laitteiden hankinta- ja asennuskustannuksille, sisältäen tarpeenmukaisen ilmastoinnin vaatiman automatiikan ja lämmityspotkimuutokset [47].

Investointikustannuksissa keskitetylle järjestelmälle ei huomioitu mahdollisia lisäkus-tannuksia rakenteiden vahvistamisesta ilmastointikonehuoneen rakentamisen mahdollis-tamiseksi, sillä tällaiset kustannukset ovat pitkälti kohdekohtaisia ja niitä on hyvin vai-kea arvioida yleisesti. Lisäksi investointikustannuksissa ei huomioitu mahdollisia muita rakennusteknisiä kustannuksia, kuten alakattotöitä. Näin ollen investointikustannukset keskitetyn järjestelmän osalta saattaisivat todellisuudessa olla korkeammat kuin tässä tutkimuksessa lasketut kustannukset, mikä on huomioitava tuloksia tarkasteltaessa.

7.2.2 Käyttökustannukset

Ilmanvaihtolaitoksen elinkaarikustannukset muodostuvat investointikustannusten lisäksi vuosittaisista käyttö- ja huoltokustannuksista. Ilmanvaihtojärjestelmän käyttökustan-nukset muodostuvat pääasiassa puhaltimien kuluttamasta sähköenergiasta sekä tuloil-man lämmittämiseen kuluneesta energiasta.

Keskitettyssä järjestelmässä tuloilma lämmitetään yleensä vesikiertoisella jälkilämmi-tyspatterilla, joka on usein kytketty kaukolämpöön. Hajautetussa järjestelmässä tuloil-

man jälkilämmitys toteutetaan useimmiten sähkövastuksella, jolloin vältetään suurilta muutoksilta lämmitysputkistoon. Koneellisessa poistojärjestelmässä ulkoa tilaan tuleva korvausilma lämmitetään tilan lämmitysjärjestelmällä, usein vesikiertoisilla radiaattoreilla tai lattialämmityksellä. Tilan lämmitysjärjestelmä on usein kytketty kaukolämpöön.

Laskelmissa oletetaan sekä keskitetyn että hajautetun järjestelmän käyvän vakioilmavirralla $6 \text{ dm}^3/\text{s}$ henkilöä kohden arkisin klo 06-16 ympäri vuoden. Koneellinen poistoilmanvaihto puolestaan toimii vakioilmavirralla siten, että joulukuusta huhtikuuhun poistopuhaltimet käyvät puoliteholla, muun ajan täydellä teholla.

Puhaltimien ja ilmanvaihtokoneiden sähköenergian kulutus lasketaan kaavalla:

$$E_{iv} = \sum P_{es} q_v \Delta t \quad (16)$$

E_{iv} on ilmanvaihtokoneiden puhaltimien sähköenergiankulutus [kWh]

P_{es} on yksittäisen puhaltimen ominaissähköteho [$\text{kW}/(\text{m}^3/\text{s})$]

q_v on yksittäisen ilmanvaihtokoneen suurempi ilmavirta [m^3/s]

Δt on puhaltimen käyttöaika laskentajaksolla [h].

Puhaltimien vuosittaiset käyttötunnit lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\Delta t = t_{tot} t_d t_v \quad (17)$$

Δt on puhaltimen käyttöaika laskentajaksolla [h]

t_{tot} on laskentajakson kokonaistuntimäärä [h]

t_d on puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen keskimääräinen vuorokautinen käyntiaikasuhde [h/24h]

t_v on puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen viikoittainen käyntiaikasuhde [vrk/7vrk].

Keskitetyssä ja hajautetussa järjestelmässä tuloilma esilämmitetään poistoilmasta talteenotetun lämmön avulla. Kaikkein kylmimmillä ilmoilla tuloilmaa ei kuitenkaan saada pelkän lämmöntalteenoton avulla lämmitettyä haluttuun sisäänpuhalluslämpötilaan. Tällöin on käytettävä jälkilämmityspatteria, joka hajautetussa järjestelmässä toimii sähköllä ja keskitetyssä järjestelmässä vesikierrolla. Lopulta tuloilma lämpenee huoneilman lämpötilaan tilan lämmitysjärjestelmällä. Myös tämä ilman huoneessa lämpeneminen otetaan huomioon energiankulutuksen laskemisessa, jotta voidaan vertailla keskitettyä

ja hajautettua järjestelmää koneelliseen poistojärjestelmään, jossa ulkoilma kulkeutuu suoraan tilaan ja tilan lämmitysjärjestelmä lämmittää sen huonelämpötilaan.

Lämpötila vaihtelee vuorokauden aikana ja on keskimäärin korkeampi päivisin kuin yöllä. Koulurakennuksessa ilmanvaihdon käyntiaika rajoittuu päiväsaikaan, joten se on huomioitava ilmanvaihdon lämmitysenergiälaskelmissa muuntokertoimen avulla. Muuntokerroin lasketaan rakentamismääräyskokoelman D5 mukaisesti [48]. Tässä tapauksessa ilmanvaihdon oletetaan käyvän päivisin klo 06-16. Myös ilmanvaihtokoneen käyntiaika suhteessa tarkasteltavan ajanjakson kokonaistuntimäärään on huomioitava laskelmissa. Tämä huomioidaan käyttämällä laskuissa viikoittaisia ja vuorokautisia käyntiaikasuhteita.

Tuloilman lämpenemisen vaatima lämmitysenergia sen lämmitessä sisäänpuhalluslämpötilasta huonelämpötilaan hajautetun ja keskitetyn ilmastointijärjestelmän tapauksessa voidaan laskea seuraavasti:

$$Q_{iv,sp} = \rho_i c_{pi} q_v t_d r t_v (t_s - t_t) \Delta t / 1000 \quad (18)$$

$Q_{iv,sp}$ on tuloilman energiankulutus sen lämmitessä huoneilman lämpötilaan [kWh]

ρ_i on ilman tiheys [kg/m³]

c_{pi} on ilman ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]

q_v on ilman tilavuusvirta [m³/s]

t_d on puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen keskimääräinen vuorokautinen käyntiaikasuhte [h/24h]

r on muuntokerroin, joka ottaa huomioon ilmanvaihtolaitoksen vuorokautisen käyntiajan

t_v on puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen viikoittainen käyntiaikasuhte [vrk/7vrk]

t_t on tuloilman lämpötila [°C]

t_s on sisälämpötila [°C]

Δt on ajanjakson pituus [h]

1000 on kerroin jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi.

Ilmanvaihdon vaatima lämpöenergia ilman lämmöntalteenottoa saadaan kaavalla (19). Tällä kaavalla voidaan laskea myös koneellisen poistoilmanvaihdon vaatima lämmitysenergia, kun ulkoa kulkeutuva korvausilma lämmitetään sisälämpötilaan:

$$Q_{iv} = \rho_i c_{pi} q_v t_d r t_v (t_s - t_u) \Delta t / 1000 \quad (19)$$

Q_{iv} on korvausilman energiankulutus sen lämmitessä huoneilman lämpötilaan [kWh]
 t_u on ulkolämpötila [$^{\circ}\text{C}$].

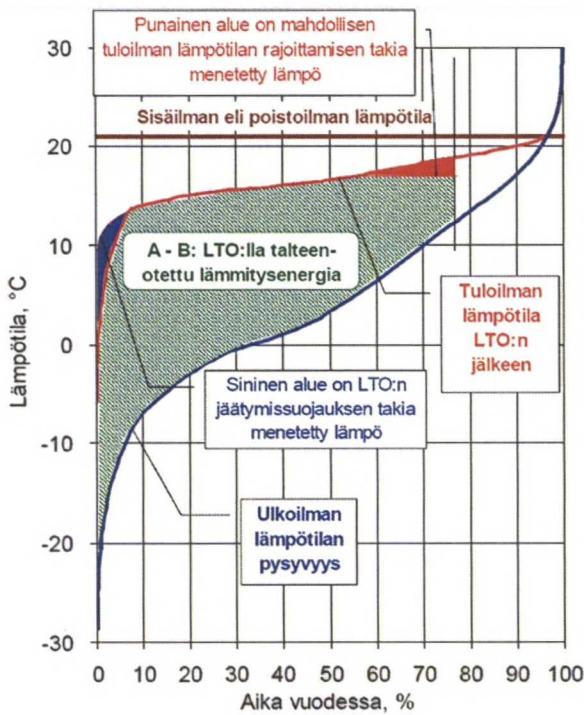
Ilmanvaihdon jälkilämmityspatterin lämmöntarve voidaan laskea kaavalla (20), kun lämmöntalteenoton tuloilman vuosihyötysuhde on tiedossa:

$$Q_{jl, patteri} = \rho_i c_{pi} q_v t_d r t_v (t_t - t_u - \eta_{a,t} (t_s - t_u)) \Delta t / 1000 \quad (20)$$

$Q_{jl, patteri}$ on tuloilman jälkilämmityspatterin energiankulutus [kWh]
 $\eta_{a,t}$ on lämmöntalteenoton tuloilman vuotuinen hyötysuhde [-].

Jos lämmöntalteenoton tuloilman vuosihyötysuhde ei ole tiedossa, voidaan se laskea laitevalmistajan ilmoittaman lämmöntalteenoton tuloilman lämpötilahyötysuhteen avulla. Vuosihyötysuhde kuvaa lämmöntalteenoton tehokkuutta paremmin kuin lämpötilahyötysuhde. Vuosihyötysuhteen laskennassa huomioidaan lämmöntalteenoton tehoa rajoittavat tekijät, kuten lämmönsiirtimen jäätymisen esto ja tuloilman lämpötilan rajoittaminen, alueelliset sääolosuhteet, ilmavirtojen suhde sekä erillispoistojen ilmavirrat. Vuosihyötysuhde kertoo koko lämmityskauden aikana talteen otettavan ja hyödynnettävän lämpömäärän suhteen ilmastoinnin lämmityksen tarvitsemaan lämpömäärään. [49]

Lämmönsiirtimen jäätymisen esto tarkoittaa sitä, että kylmillä ilmoilla jäteilmän lämpötilaa on rajoitettava lämmöntalteenoton hyötysuhdetta madaltamalla, ettei poistoilmasta kondensoitunut kosteus jäätyisi lämmönsiirtimen pinnalle. Lämmityskauden lämpimimmillä ilmoilla lämmöntalteenoton hyötysuhdetta on puolestaan rajoitettava, jotta sisäilman lämpötila ei nouse haluttua arvoa korkeammaksi. Kuvassa 43 on esitetty graafisesti LTO:lla talteenotettava lämmitysenergia ja sitä rajoittavat tekijät.



Kuva 43. LTO:lla talteenotettava lämmitysenergia rajoitteineen [49]

Ilmanvaihdon vuosihyötysuhde voidaan laskea seuraavasti:

$$\eta_a = \frac{Q_{LTO}}{Q_{iv}} \quad (21)$$

η_a on lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde

Q_{LTO} on lämmöntalteenotolla talteenotettu energia [kWh]

Q_{iv} on ilmanvaihdon vaatima lämmitysenergia, jos lämmöntalteenottoa ei olisi [kWh].

Sisä- ja ulkolämpötilojen erotus sekä ajanjakso, jolloin ilmavirta ja sitä vastaavat lämpötilat esiintyvät, voidaan ilmaista lämmöntarvelukuina. Lämmöntarveluku halutulle lämpötilalle voidaan laskea ulkolämpötilan pysyvyysarvoista. Ulkolämpötilojen pysyvyys eri vyöhykkeillä vuoden eri kuukausina nykyisessä ilmastossa saadaan Ilmatieteenlaitoksen säädatasta [50]. Tutkimuksen kohteena oleva koulu sijaitsee Helsingissä, joten laskennassa käytetään säädataa vyöhykkeillä I ja II (Vantaa).

Ilmanvaihdon vaatima lämpöenergia ilman lämmöntalteenottoa voidaan laskea lämmöntarveluvun avulla seuraavasti:

$$Q_{iv} = \rho_i c_{pi} q_v S_s \quad (22)$$

S_S on lämmöntarveluku, joka ilmaisee sisä- ja ulkolämpötilojen erotuksen painotettuna ulkolämpötilan pysyvyyttä vastaavalla arvolla.

Sisä- ja ulkolämpötilojen erotusta vastaava lämmöntarveluku voidaan laskea seuraavasti:

$$S_S = \sum (t_s - t_{u,n}) \Delta t \quad (23)$$

$t_{u,n}$ on tiettyä pysyvyysarvoa vastaava ulkolämpötila

Δt on ajanjakso, jonka aikana sitä vastaavat lämpötilat esiintyvät [h].

Lämmöntalteenotolla poistoilmasta talteenotettu lämpöenergia voidaan esittää tuloilman lämmitysenergiana seuraavasti:

$$Q_{LTO} = c_{pi} \rho q_v S_T \quad (24)$$

S_T on lämmöntarveluku, joka ilmaisee LTO:n jälkeisen tuloilman lämpötilan ja ulkolämpötilan erotuksen painotettuna ulkolämpötilan pysyvyyttä vastaavalla arvolla.

LTO:n jälkeisen lämpötilan ja ulkolämpötilan erotusta vastaava lämmöntarveluku voidaan laskea seuraavasti:

$$S_T = \sum (t_{tLTO} - t_{u,n}) \Delta t \quad (25)$$

t_{tLTO} on tuloilman lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen

Δt on ajanjakso, jonka aikana sitä vastaavat lämpötilat esiintyvät [h].

7.2.3 Huoltokustannukset

Huoltokustannukset muodostuvat ilmastointikoneissa pääosin kuluneiden tai rikkoutuneiden komponenttien vaihtamisesta, kuten myös likaantuneiden ilmansuodattimien vaihtamisesta. Koneellisessa poistojärjestelmässä huoltokustannukset ovat hyvin vähäisiä, sillä järjestelmä koostuu ainoastaan poistoilmapääte-elimistä, kanavoinnista sekä poistopuhaltimista.

Koneellisessa tulo-poistojärjestelmässä ilmansuodattimet on vaihdettava säännöllisesti, keskimäärin 1-2 kertaa vuodessa riippuen kohteesta. Vuosittaiset huoltokustannukset

ilmastointikonetta kohti laskettiin käyttäen suodatinvalmistajan antamia hintatietoja [51].

7.2.4 Ilmanvaihtojärjestelmän elinkaaren aikaiset kokonaiskustannukset

Ilmanvaihtojärjestelmän kokonaiskustannukset sen elinkaaren aikana saadaan nykyarvoon perustuvalla menetelmällä. Nykyarvomenetelmässä huomioidaan inflaation ja eskalaation vaikutukset kokonaiskustannuksiin. [52]

Reaalikorko, joka huomioi inflaation ja nimelliskoron vaikutuksen pääoman arvoon, voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$r = \frac{i-f}{1+f} \quad (26)$$

r on reaalikorko

i on nimelliskorko

f on inflaatio.

Joidenkin tuotteiden ja palveluiden hintakehitys voi poiketa selkeästi yleisen inflaation tasosta. Energia on tällainen tuote, ja energian yleisestä hintakehitystä poikkeavaa hinnan kehitystä kuvataan käsitteellä eskalaatio. [52] Eskalaation huomioon ottava reaalikorko voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$r_e = \frac{r-e}{1+e} \quad (27)$$

r_e on eskalaation huomioiva reaalikorko

r on reaalikorko

e on eskalaatio.

Jaksollisille suorituksille voidaan laskea reaalikoron avulla inflaation ja nimelliskoron huomioiva diskonttaustekijä seuraavalla kaavalla:

$$a'_n = \frac{1-(1+r)^{-n}}{r} \quad (28)$$

r on reaalikorko

n on tarkasteluaika [a].

Inflaation ja eskalaation huomioon ottavaa diskonttaustekijää tarvitaan energiakustannusten nykyarvon laskemiseen, ja se voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$\alpha''_n = \frac{1-(1+r_e)^{-n}}{r_e} \quad (29)$$

r_e on eskalaation huomioon ottava reaalikorko

n on tarkasteluaika [a].

Ilmanvaihdon elinkaarikustannusten nykyarvo voidaan laskea seuraavasti:

$$P = \alpha''_s E_s h_s + \alpha''_k E_k h_k + \alpha' H + I_0 \quad (30)$$

α''_s on inflaation ja eskalaation huomioon ottava diskonttaustekijä kumuloituville suorituksille (sähkön osalta)

E_s on sähköenergian vuosikulutus [kWh]

h_s on sähkön hinta [€]

α''_k on inflaation ja eskalaation huomioon ottava diskonttaustekijä kumuloituville suorituksille (kaukolämmön osalta)

E_k on kaukolämmön vuosikulutus [kWh]

h_k on kaukolämmön hinta [€]

α' on inflaation huomioon ottava jaksollisten suoritusten diskonttaustekijä

H on vuosittaiset huoltokustannukset [€]

I_0 on investointikustannukset [€].

7.3 Kustannuslaskennan tulokset

7.3.1 Investointikustannukset

Investointikustannukset tilakohtaisilla ilmastointikoneilla toteutetulle hajautetulle järjestelmälle ja keskitetylle järjestelmälle on esitetty taulukossa 33. Yhden tilakohtaisen ilmastointikoneen hinta on noin 6500 €, joten materiaalien ja asennustyön osuudeksi muodostui 3700 € ilmastointikonetta kohden. Opetustilaneliötä kohden hinnaksi muodostui keskitetyllä järjestelmällä 158 €/m² ja hajautetulla järjestelmällä 175 €/m².

Taulukko 33. Keskitetyn ja hajautetun ilmanvaihtojärjestelmän investointikustannukset

	Keskitetty järjestelmä [€]	Tilakohtaiset IV-koneet 19 kpl [€]
Ilmanvaihtokone	20910	10200 €/kpl (sis. työn)
Ilmanvaihtokonehuone (20 m ²)	28200	
Kanavisto ja ilmanjakolaitteet	57912	
Lämpöjohtotyöt	1800	
Automaatio (IMS)	44510	
Suunnittelu	22332	
Kokonaishinta alv. 0 %	175664	193800

7.3.2 Käyttökustannukset

Energiankulutuslaskelmissa on käytetty ilmapvirtaa 6 (dm³/s)/hlö ja luokan henkilömääränä 26 henkilöä. Luokahuoneiden lukumäärä on 19. Taulukossa 34 on esitetty energian vuosikulutus sekä sähkön että kaukolämmön osalta eri järjestelmillä. Taulukosta nähdään, että tilakohtaisilla ilmastointikoneilla toteutettu hajautettu järjestelmä kuluttaa kokonaisuudessaan noin 20 % vähemmän energiaa kuin koneellinen poistojärjestelmä tai keskitetty ilmastointijärjestelmä.

Sähköenergiaa hajautettu järjestelmä käyttää eniten johtuen sähköpattereilla toimivasta tuloilman jälkilämmityksestä. Hajautettu järjestelmä käyttää keskitettyyn verrattuna noin 6 % enemmän sähköenergiaa vuodessa. Keskitetyn järjestelmän sähkönkulutus aiheutuu ainoastaan puhaltimien energiankulutuksesta. Hajautetussa järjestelmässä sähkönkulutuksessa ovat mukana sekä puhaltimet että jälkilämmityspatteri. Koneelliseen poistojärjestelmään verrattuna hajautettu käyttää noin 116 % enemmän sähköenergiaa. Koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä sähköenergiankulutus syntyy puhaltimien energiankulutuksesta.

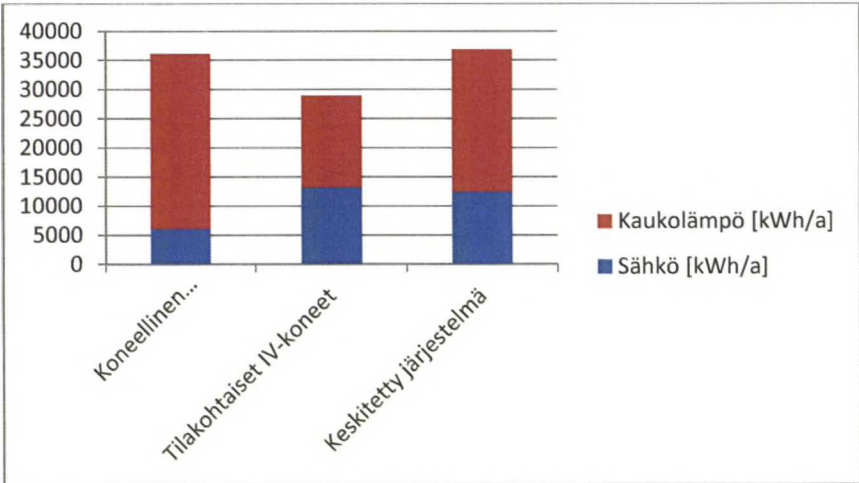
Kaukolämpöä hajautettu järjestelmä kuluttaa vähiten. Hajautettu järjestelmä kuluttaa keskitettyyn järjestelmään verrattuna noin 36 % vähemmän kaukolämpöä ja koneelliseen poistoilmanvaihtojärjestelmään verrattuna noin 48 % vähemmän kaukolämpöä. Kaukolämmön kulutuksessa on huomioitu sekä hajautetussa että keskitetyssä ilmastointijärjestelmässä tuloilman lämpeneminen huoneilman lämpötilaan. Lisäksi keskitetyssä järjestelmässä kaukolämmön kulutus sisältää tuloilman jälkilämmityspatterin energian-

kulutuksen. Koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän kaukolämpöenergian kulutus syntyy korvaus- eli ulkoilman lämmittämisestä sisälämpötilaan. Kuvassa 44 on esitetty vuosittainen energiankulutus pylväsdiagrammissa eriteltynä sähkön ja kaukolämmön kulutukseen eri järjestelmillä.

Koneellisen tulo-poistojärjestelmän energiankulutus on laskettu käyttäen vakioilmavirtaa 6 dm³/s henkilöä kohden, vaikka järjestelmät todellisuudessa toimisivatkin tarpeenmukaisella ohjauksella. Tarpeenmukaisella ohjauksella laskettuna energiankulutus olisi todennäköisesti ollut vielä pienempi [53]. Lisäksi koneellisessa tulo-poistojärjestelmässä on käytetty pyörivän LTO-kiekon jäteilmarajoituksena 0 °C, vaikka jäteilma rajoitus voisi olla käytännössä tätäkin alhaisempi johtuen luokkahuoneen matalasta kosteuskuormituksesta. Alhaisemmalla jäteilman lämpötilarajoituksella lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde kasvaisi ja tuloilman jälkilämmitysenergiankulutus pieneneisi.

Taulukko 34. Energian vuosikulutus sekä sähkön että lämmön osalta eri ilmanvaihtojärjestelmillä

Energiankulutus (kWh/a)	Koneellinen pois-toilmanvaihto	Tilakohtaiset IV-koneet	Keskitetty järjes-telmä
Tuloilmapuhallin	0	3323	5873
Poistoilmapuhallin	6168	3014	6646
Tuloilman jälkilämmitys (sähkö)	0	6957	0
Tuloilman jälkilämmitys (kaukolämpö)	0	15703	24350
Korvausilman lämmittäminen	30034	0	0
Sähkö (kWh/a)	6168	13293	12519
Kaukolämpö (kWh/a)	30034	15703	24350
Energiankulutus yht. (kWh/a)	36202	28996	36869



Kuva 44. Energian vuosikulutus sähkön ja lämmön osalta eri ilmanvaihtojärjestelmillä

Taulukossa 35 on esitetty energian vuosittaiset kustannukset. Kustannukset on esitetty myös opetustilaneliötä kohden. Sähkön hintana on käytetty 0,0861 €/kWh ja kaukolämmön hintana 0,454 €/kWh [54]. Energian vuosikustannuksissa ei ole merkittävää eroa. Energiankulutukseen verrattuna kustannuksia järjestelmien välillä tasoittaa sähkön selkeästi korkeampi hintataso. Hajautettu järjestelmä on energian vuosikustannuksiltaan halvin, noin 15 % halvempi kuin keskitetty järjestelmä ja noin 2 % halvempi kuin koneellinen poistojärjestelmä.

Taulukko 35. Energian vuosittaiset kokonaiskustannukset ja neliökustannukset kohden eri ilmanvaihtojärjestelmillä (alv. 0 %)

Energian vuosikustannukset	Koneellinen poistoilmanvaihto	Tilakohtaiset IV-koneet	Keskitetty järjestelmä
Sähkö (€/a)	531	1145	1078
Sähkö (€/a, m²)	0,5	1,0	1,0
Kaukolämpö (€/a)	1364	713	1106
Kaukolämpö (€/a, m²)	1,2	0,6	1,0
Yhteensä €/a (alv. 0 %)	1895	1858	2184
Yhteensä €/a, m² (alv. 0 %)	1,7	1,7	2,0

7.3.3 Huoltokustannukset

Taulukossa 36 on esitetty vuosittaiset huoltokustannukset hajautetulle ja keskitetylle järjestelmälle kokonaiskustannuksina ja kustannuksina opetustilaneliötä kohden. Huoltokustannukset muodostuvat suodattimien vaihdosta, laskelmassa suodattimet vaihdetaan kerran vuodessa. Hajautetun järjestelmän huoltokustannukset ovat selkeästi korkeammat johtuen ilmastointikoneiden suuresta määrästä (19 kpl). Suodattimen vaihtotyön hinnaksi on arvioitu 60 €/h (alv. 0%) ja yhteen tilakohtaisen ilmastointikoneen suodattimen vaihtoon oletetaan kuluvan 10 minuuttia ja keskitetyn järjestelmän suodatinsarjan vaihtoon 30 minuuttia. Koneellisessa poistojärjestelmässä huoltokustannuksia ei juuri ole, sillä poistoilmaa tai tuloilmaa ei suodateta. Muita satunnaisia huoltokustannuksia on hyvin vaikea arvioida ja niiden kustannusvaikutus ei ole kovin suuri.

Taulukko 36. Huollon vuosittaiset kustannukset eri järjestelmillä (alv. 0 %)

Huollon vuosikustannukset	Tilakohtaiset IV-koneet	Keskitetty järjestelmä
Suodattimien vaihto (€/a)	2561	748
Suodattimien vaihto (€/a, m²)	2,3	0,7

7.3.4 Kokonaiskustannusten nykyarvo

Taulukossa 37 on esitetty kokonaiskustannusten nykyarvo käyttäen kolmea eri tarkasteluaikaa. Nykyarvolaskennassa on otettu huomioon investointikustannus, sekä vuosittaiset huolto- ja käyttökustannukset koko tarkasteluajalta. Nimelliskorkona on käytetty 5 %, inflaationa 3 % ja eskalaationa 1 %.

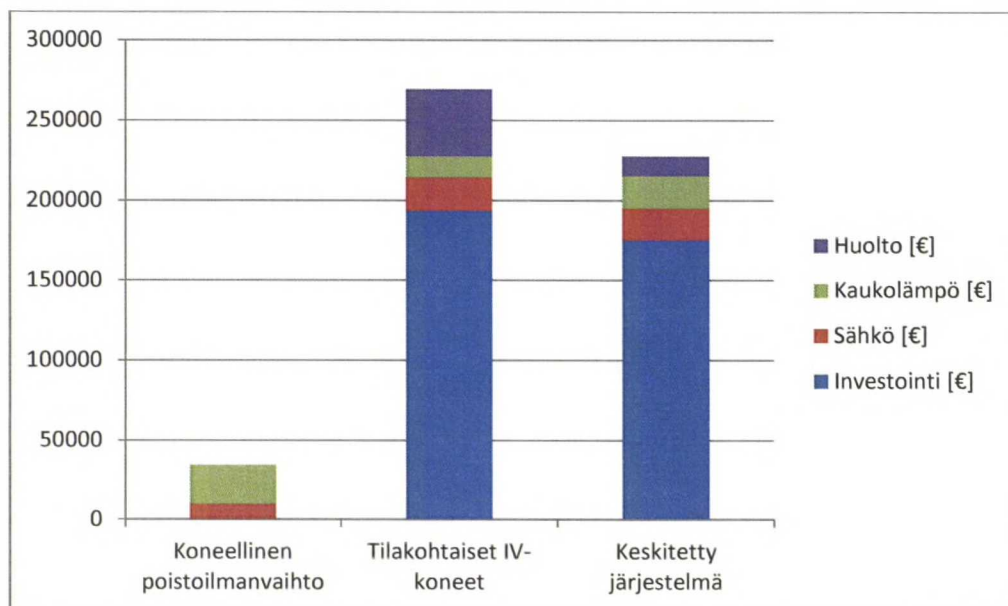
Taulukko 37. Kokonaiskustannusten ja neliökustannusten nykyarvo eri järjestelmillä 15, 20 ja 25 vuoden tarkasteluaikana (alv. 0 %)

a'_n	a''_n	Tarkasteluaika [a]	Hinta	Koneellinen poistoilmanvaihto	Tilakohtaiset IV-koneet	Keskitetty järjestelmä
12,91	13,94	15	€	26416	252747	215758
			€/m²	24	228	195
16,44	18,17	20	€	34435	269670	227645
			€/m²	31	243	205
19,66	22,21	25	€	42090	285406	238871
			€/m²	38	257	215

Hajautettu järjestelmä on kallein ratkaisu. Kokonaiskustannukset tilakohtaisilla ilmastointikoneilla toteutetussa hajautetussa järjestelmässä ovat 17-19 % korkeammat kuin keskitetyllä järjestelmällä, riippuen käytetystä tarkasteluajasta. Lyhyemmällä tarkasteluajalla kustannuserot ovat pienempiä.

Hajautetun järjestelmän suurempien investointikustannusten lisäksi sen keskitettyä järjestelmää selvästi suuremmat huoltokustannukset aiheuttavat ratkaisun korkean hinnan. Koneellinen poistojärjestelmä on halvin, mutta se on vertailussa mukana vain referenssinä. Koneellisessa poistojärjestelmässä ei ole investointikustannuksia eikä huoltokustannuksia, mikä selittää alhaisen hinnan. Koneellinen poistojärjestelmä on laatuasoltaan kuitenkin selkeästi koneellista tulopoistojärjestelmää huonompi.

Kuvassa 45 on esitetty kokonaiskustannuksien nykyarvon muodostuminen 20 vuoden tarkasteluajana eri ilmanvaihtojärjestelmillä eriteltynä kustannuslajeittain. Kuvasta nähdään tilakohtaisten ilmastointikoneiden korkeampien vuosittaisten huoltokustannusten vaikutus kokonaiskustannusten nykyarvoon.



Kuva 45. Kokonaiskustannukset 20 vuoden tarkasteluajana kustannuslajeittain eri ilmanvaihtojärjestelmillä

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tilakohtainen ilmastointikone osoittautui käyttökelpoiseksi ilmanvaihtoratkaisuksi koululuokassa. Tilakohtaisella ilmastointikoneella saatiin aikaan hyvät sisäilmastolosuhteet oleskelualueelle. Käytettäessä tarpeenmukaista ilmanvaihtoa riittävän suurella maksimi-ilmavirran asetusarvolla (noin 8,7 dm³/s, hlö) luokkahuoneen hiilidioksidipitoisuudet pysyivät hyvinkin alhaisella tasolla, eivätkä ylittäneet kertaakaan rakentamismääräysten enimmäissuositusarvoa 1200 ppm. Tarpeenmukainen ohjaus on koululuokkaan soveltuva ratkaisu, sillä luokan käyttöaste vaihtelee päivän aikana.

Tilakohtaisen ilmastointikoneen oma tarpeenmukaisen ohjauksen anturi mukaili pääosin luokan hiilidioksidipitoisuuden kasvua, mutta ajoittain se mittasi liian alhaisia arvoja verrattuna luokan hiilidioksidipitoisuuteen. Tilakohtaista ilmastointikonetta käytettäessä tarpeenmukaisella ohjauksella tulisivatkin käyttää hiilidioksidianturia, tai varmistaa, että käytettävä anturi reagoi epäpuhtauskuormituksen kasvamiseen luotettavasti.

Tilakohtaiset ilmastointikoneet tulisi huollon ja seurannan helpottamiseksi kytkeä tietoverkkoon, jolloin niiden toimintaa voitaisiin seurata keskitetysti jokaisen koneen yksilöidyn IP-osoitteen avulla. Tällä tavoin kouluisännän ei tarvitse kiertää niin usein luokissa tarkastamassa koneiden mahdollisia toimintahäiriöitä.

Ilman nopeusmittauksissa havaittiin melko korkeita ilman nopeuksia lattian rajassa vielä 3 metrin etäisyydellä tilakohtaisesta ilmastointikoneesta. Tämä alue kuuluu ilmastointikoneen valmistajan ilmoittamaan lähivyöhykkeeseen, jossa voidaan olettaakin esiintyvän korkeampia nopeuksia. Nilkat kuitenkin sietävät suurempia ilman nopeuksia kuin niskan alue. Kiinteiden työpisteiden sijoittamista ilmastointikoneen lähivyöhykkeelle tulisi välttää, vaikka luokkahuoneessa tämä on saattaa usein olla vaikeaa. Keskellä oleskelualueutta ilman nopeus oli hyvin alhainen käytettäessä tilakohtaista ilmastointikonetta. Tilakohtaisessa ilmastointikoneessa tulisi ehdottomasti olla säädettävä puhalluskuvio, jotta se voidaan säätää siten, ettei ilmavirta suuntaudu suoraan oleskelualueelle. Puhalluskuvio voidaan säätää esimerkiksi seinien suuntaiseksi.

Luokan ja ulkoilman välinen paine-ero pieneni tilakohtaista ilmastointikonetta käytettäessä. Paine-ero oli kuitenkin koneelliselle tulopoistojärjestelmälle hieman tavallista suurempi. Tämä johtui siitä, että kohteessa oli käytössä osaa tiloja palveleva koneellinen

poistoilmanvaihtojärjestelmä, jonka ilmavirtoja ei ollut säädetty vielä oikean suuruiseksi sen jälkeen, kun luokkatilojen poistoilmaventtiilit oli suljettu tilakohtaisten ilmastointikoneiden lisäämisen jäljiltä.

Tilakohtaisilla ilmastointikoneilla toteutetun hajautetun ilmanvaihtojärjestelmän kokonaisenergiankulutus oli pienempi kuin keskitetyssä ilmanvaihtojärjestelmässä tai koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä. Vaikka tilakohtaisen ilmastointikoneen tuuloilman jälkilämmitys toteutetaan sähköpatterilla, ei tilakohtaisen ilmastointikoneen kokonaissähkönkulutus ollut juurikaan keskitettyä järjestelmää suurempi johtuen hyvästä lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteesta ja puhaltimien alhaisesta sähkönkulutuksesta.

Korkeampien investointikustannusten ja vuosittaisten huoltokustannusten vuoksi kokonaiskustannusten nykyarvo oli hajautetussa tilakohtaisilla ilmastointikoneilla toteutetussa järjestelmässä keskitettyä ilmastointijärjestelmää korkeampi. On kuitenkin huomiotava, että investointikustannuksia laskettaessa tilakohtaiselle ilmastointikoneelle käytössä oli toteutuneet kokonaiskustannukset, kun taas keskitetylle ilmastointijärjestelmälle kustannukset arvioitiin. Todellisuudessa keskitetyn ilmastointijärjestelmän investointikustannukset saattavat kohteesta riippuen olla korkeampiakin.

Tilakohtaiset ilmastointikoneet soveltuvat koululuokkien ilmanvaihtojärjestelmäksi etenkin silloin, kun on tarpeen saada nopea ratkaisu sisäilmasto-ongelmiin. Tilakohtainen ilmastointikone on nopea asentaa, eikä vaadi kohteeseen juurikaan rakenteellisia muutoksia. Lisäksi vanhoissa koulurakennuksissa saattaa olla lähes mahdotonta rakentaa ilmastointikonehuone, tai ratkaista ilmastointikanavien reititykset järkevästi. Tällöin tilakohtaiset ilmastointikoneet saattaisivat olla perusteltu ratkaisu. Laajempaa ilmanvaihdon perusparannusta suunniteltaessa olisi kuitenkin tapauskohtaisesti tutkittava, mikä on paras ratkaisu kyseiseen kohteeseen.

LÄHDELUETTELO

- 1 Ympäristöministeriö. D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet 2012. Rakennetun ympäristön osasto, 2011.
- 2 Sisäilmayhdistys ry. Sisäilmastoluokitus 2008. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. ISBN 978-952-5236-34-X.
- 3 Seppänen O. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Solver Palvelut Oy, Anjalan-
koski 2008. 348 s. ISBN 951-96998-0-6.
- 4 Suomen standardisoimisliitto SFS. SFS-EN ISO 7730. Lämpöolojen ergonomia. Lämpömukavuuden analyttinen määrittäminen ja tulkinta käyttäen laskettuja PMV- ja PPD-indeksejä sekä paikallista lämpömukavuutta. Suomen standardi-
soimisliitto SFS, 2006. 52 s.
- 5 Seppänen, O. A.; Fisk, J. W. & Mendell, M. J.; Association of ventilation rates
and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and insti-
tutional buildings. Indoor Air, 1999. Vol. 9, nro 4. s. 226–252.
- 6 Shaughnessy, R. J.; Haverinen-Shaughnessy U.; Nevalainen, A. & Moschandreas,
D. A preliminary study on the association between ventilation rates in class-
rooms and student performance. Indoor Air, 2006. Vol. 16, nro 6. s. 465–468.
- 7 Haverinen-Shaughnessy U.; Moschandreas, D. J. & Shaughnessy, R. J. Associa-
tion between substandard classroom ventilation rates and students' academic
achievement. Indoor Air, 2011. Vol. 21, nro 2. s. 121–131.
- 8 Mendell, M. J. & Heath, G. A. Do indoor pollutants and thermal conditions in
schools influence student performance? A critical review of the literature. Indoor
Air, 2005. Vol. 15, nro 1. s. 27-52.
- 9 Bakó-Biró, Zs.; Clements-Croome, D.J.; Kochhar, N.; Awbi, H.B. & Williams,
M.J. Ventilation rates in schools and pupils' performance. Building and Envi-
ronment, 2012. Vol. 48. s. 215-223.

- 10 Asikainen, V. & Peltola, S. Sisäilmaongelmaisten koulurakennusten korjaaminen. Vammalan kirjapaino Oy, 2008. 247 s. ISBN 978-952-13-3851-9.
- 11 Murakami, S.; Kaneko, T.; Ito, K. & Fukao, H.; Study on the productivity in classroom (Part 1). Proceedings of Healthy Buildings 2006 conference. Lisboa, Portugal. 4-8 June, 2006. s. 271-276.
- 12 Wargocki, P. & Wyon, D. P. The performance of schoolwork by children is affected by classroom air quality and temperature. Proceedings of Healthy Buildings 2006 conference. Lisboa, Portugal. 4-8 June, 2006. s. 379.
- 13 Tilastokeskus. Sähköpostin liitteenä vastaanotettu Excel-tiedosto sekä Suomen virallinen tilasto (SVT): Koulutuksen järjestäjät ja oppilaitokset [verkkojulkaisu]. Helsinki, 2010. ISSN 1796-3796. [viitattu: 16.2.2012].
- 14 Kurnitski, J.; Palonen, J.; Engberg, S. & Ruotsalainen, R. Koulujen sisäilmasto-rehtorikysely ja sisäilmastomittaukset. Teknillinen korkeakoulu, LVI-tekniikan laboratorio, raportti B43. Espoo, 1996. ISBN 951-22-3061-5.
- 15 Kurnitski, J.; Vilkki, R.; Jokiranta, K.; Kettunen, A-V. & Hejazi-Hashemi S. Koulujen sisäilmasto ja kosteusvauriot. Teknillinen korkeakoulu, LVI-tekniikan laboratorio, raportti B 46. Espoo, 1996. ISBN 951-22-3397-5.
- 16 Grimsrud, D.; Bridges, B. & Schulte, R. Continuous measurements of air quality parameters in schools. Building Research and Information, 2006. Vol. 34, nro 5. s. 447-458.
- 17 Daisey, J. M.; Angell, W. J. & Apte, M. G. Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. Indoor Air, 2003. Vol. 13, nro 1. s. 53-64.
- 18 Fatman Oy. Kuntokartoitus, Pihlajamäen ala-aste. Helsinki, 2002.
- 19 Vahanen Oy. Tutkimusselostus, Pihlajamäen ala-aste rakenne- ja kosteustekninen kuntotutkimus peruskorjauksen hankesuunnittelua varten. Espoo, 2011.
- 20 Vahanen oy. Raportti, Pihlajamäen ala-aste haitta-ainetutkimus. Espoo, 2011.

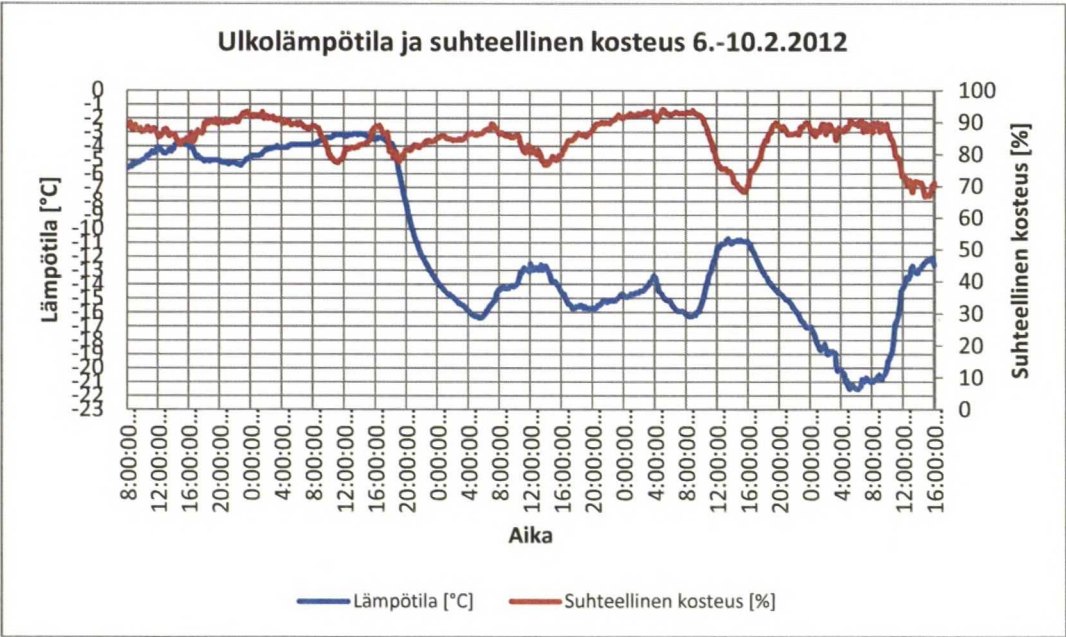
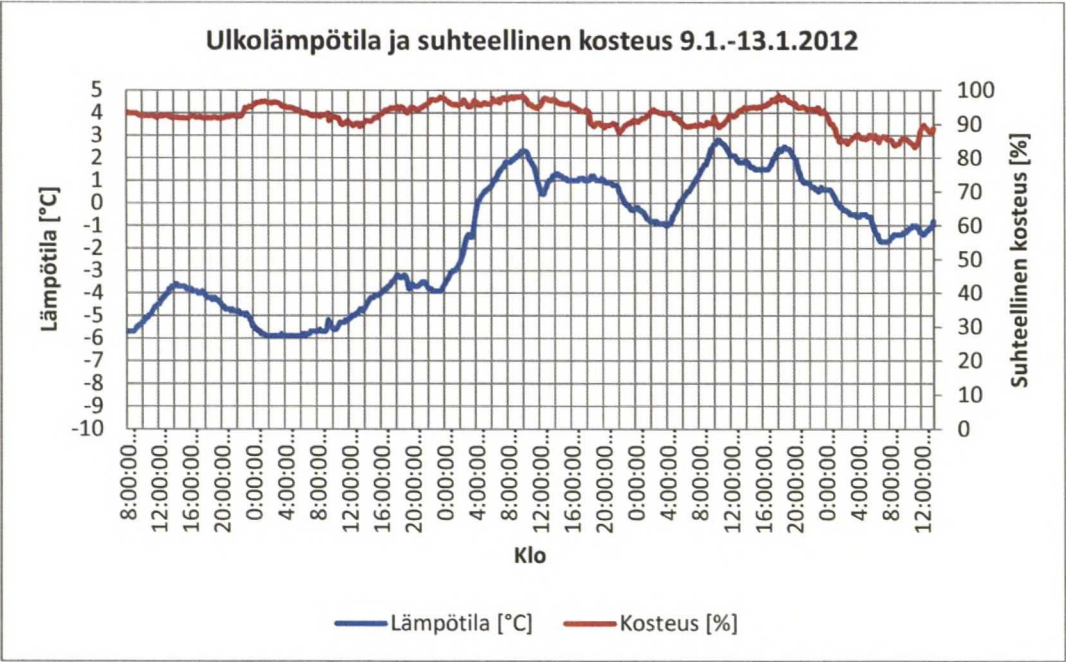
- 21 Skistad, H.; Mundt E.; Nielsen P. V.; Hagström K. & Railio J. Syrjäytysilmanvaihto muissa kuin teollisuuslaitoksissa. Sitratori REHVA: Helsinki 2003. 110 s. ISBN 951-98811-3-1.
- 22 Seppänen, O. Ilmastoinnin suunnittelu. Forssan Kirjapaino Oy, Forssa 2004. 427s. ISBN 952-91-6896-9.
- 23 Awbi, H. B.; Energy efficient room air distribution. Renewable Energy, 1998. Vol. 15, nro 1-4. s. 293-299.
- 24 Karimipannah, T.; Awbi, H. B. & Moshfegh, B. 2008. The air distribution index as an indicator for energy consumption and performance of ventilation systems. Journal of the Human-Environmental System, 2008. Vol. 11, nro 2. s. 77–84.
- 25 Jurelionis, A. & Seduikyte, L. Indoor environmental conditions in Lithuanian schools. The 7th annual international conference on Environmental engineering. Vilnius, Lithuania. May 22-23, 2008. s. 833-839.
- 26 Karimipannah, T.; Sandberg, M. & Awbi, H. B.; A comparative study of different air distribution systems in a classroom. ROOMVENT 2000, vol. 2. Reading, UK. 9-12 July, 2000. s. 1013-1018.
- 27 Karimipannah, T.; Awbi, H. B.; Sandberg, M. & Blomqvist, C. Investigation of air quality, comfort parameters and effectiveness for two floor-level air supply systems in classrooms. Building and Environment, 2007. Vol. 42, nro 2. s. 647-655.
- 28 Varodompun, J. & Navvab, M. HVAC Ventilation strategies: The contribution for thermal comfort, energy efficiency and indoor air quality. Journal of Green Building, 2007. Vol 2, nro 2. s. 131-150.
- 29 Kovanen, K.; Majanen, A. & Sirén, K. Ilmanvaihdon ja ilmanjaon vaikutus huoneilmavirtauskenttään. Teknillinen korkeakoulu, LVI-tekniikan laboratorio. Raportti B20. Espoo 1988.

- 30 Palonen, Jari.; Majanen, Antti.; Seppänen, Olli.; Sekoittava ja syrjäyttävä ilmanjako toimistohuoneessa. 1988. Teknillinen korkeakoulu, LVI-tekniikan laboratorio. Raportti B22. Espoo, 1988.
- 31 Aalto, M. Diplomityö. Koulujen ilmanvaihdon toiminta ja parantaminen sisäilmaston kannalta. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. Espoo, 2006. 95 s.
- 32 Jakobsen, T. V. Airflow and temperature distribution in rooms with displacement ventilation. Aalborg: Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1993. 116 s. (Indoor Environmental Technology; Thesis no. 6). ISSN 0902-7513 R9328.
- 33 Nielsen, P. V.; Hoff, L. & Pedersen, G. L. Displacement Ventilation by Different Types of Diffusers. University of Aalborg, Indoor Environmental Technology, Paper no. 8. Denmark, 1988. 22 s.
- 34 Norbäck, D.; Wieslander, G.; Zhang, X. & Zhao, Z. Respiratory symptoms, perceived air quality and physiological signs in elementary school pupils in relation to displacement and mixing ventilation system: an intervention study. *Indoor Air*, 2011. Vol. 21, nro 5. s. 427-437.
- 35 Swegon Oy. Compact Air & Compact Heat –koneiden asennus ja hoito-ohje. Saatavilla:
http://www.swegon.com/Global/PDFs/Air%20handling%20units/COMPACT/General/_fi/COMPACTAHpv2.04.pdf [Viitattu 22.4.2012]
- 36 Swegon Oy. Clean Air Control toimintaperiaate. Saatavilla:
http://www.swegon.com/Global/PDFs/Flow%20control/WISE/_fi/CAC.pdf [Viitattu 8.5.2012]
- 37 Testo 174H –lämpötila- ja kosteusmittarin esite. Saatavilla:
http://www.testo.com/online/embedded/Sites/INT/SharedDocuments/ProductBrochures/0572_6560_en_01.pdf [Viitattu 17.4.2012]

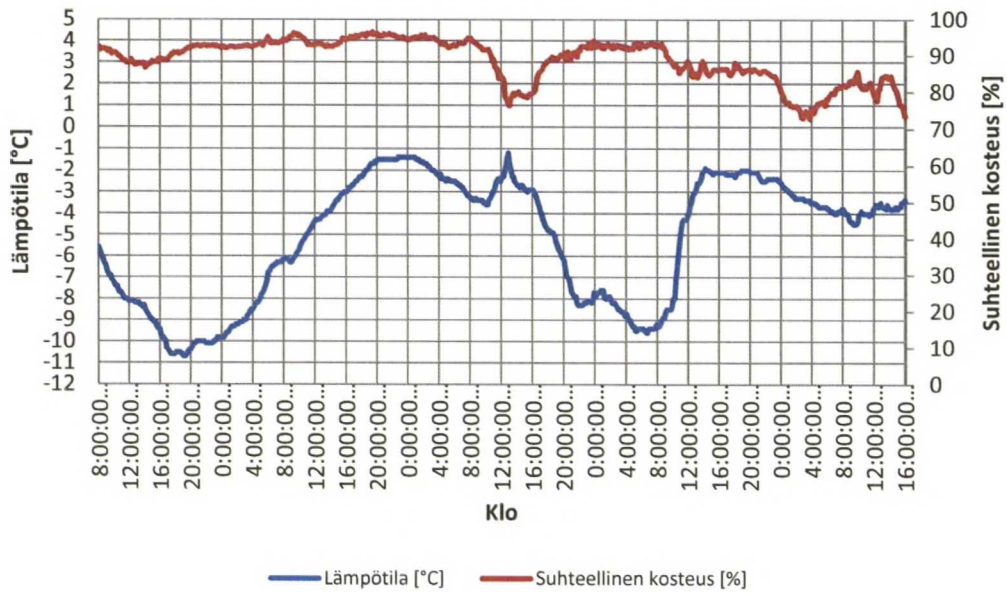
- 38 Dwyer Magnesense -paine-eromittarin esite. Saatavilla:
<http://www.swoy.fi/?file=120> [Viitattu 17.4.2012]
- 39 Sense Air CO₂ -mittarin esite. Saatavilla: http://www.senseair.se/wp-content/uploads/2011/05/ed_-asensetransmitter.pdf [Viitattu 17.4.2012]
- 40 SwemaFlow 125 -mittaushupun esite. Saatavilla:
http://www.swema.com/Prod_docs/SwemaFlow/SwemaFlow125D_eng.pdf
[Viitattu 17.4.2012]
- 41 Swema SWA03 -olosuhdeanturin esite. Saatavilla:
<http://www.swema.com/instrument.php?p=SWA%2003%20draught%20sensor&k=Air%20velocity> [Viitattu 8.5.2012]
- 42 Brüel & Kjaer. Brüel & Kjaer 2260 -äänitasomittarin manuaali.
- 43 Suomen standardisoimisliitto SFS r.y. SFS-käsikirja 103 osa 2. Ilmastointitekniikka. Lahden Kirjapaino ja Sanomalehti Oy, 1992. 200 s. ISBN 952-9591-23-3.
- 44 Swegon Oy. Compact Air & Heat -esite. Saatavilla:
http://www.swegon.com/Global/PDFs/Air%20handling%20units/COMPACT/General/_fi/COMPACT_Air_Heat_description.pdf [Viitattu 12.5.2012]
- 45 Hongisto, V. Meluntorjunta. Oppikirja-aineisto kurssille S89.3471. Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu, 2011. 225 s.
- 46 Ympäristö ja Terveys-lehti. Asumisterveysopas. Sosiaali- ja terveysministeriön Asumisterveysohjeen (STM:n oppaita 2003:1) soveltamisopas. Vaasa, 2009. 200 s. ISBN 978-952-9637-38-6.
- 47 Haahtela, Y. & Kiiras, J. Talonrakennuksen kustannustieto 2011. Haahtela-kehitys Oy. Tampere, 2011. 390 s. ISBN 978-952-5403-19-0.
- 48 Ympäristöministeriö. D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 2007. Asunto- ja rakennusosasto, 2007.

- 49 Ympäristöministeriö. Ympäristöministeriön moniste 122. Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto lämpöhäviöiden tasauslaskennassa. Helsinki, 2003. Saatavilla: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=9298&lan=fi> [Viitattu 12.4.2012]
- 50 Ilmatieteenlaitos. Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. Ulkolämpötilan pysyvyysarvot vyöhykkeillä I-II. Saatavilla: http://ilmatieteenlaitos.fi/c/document_library/get_file?uuid=aa04206f-1c99-4e62-a44d-fec3d25a3118&groupId=30106 [Viitattu 13.4.2012]
- 51 Salonen, Isto. Camfil Oy. Sähköpostikeskustelu 29.5.
- 52 Sirén, Kai. Rakennusten energiainvestointien kannattavuuden laskenta. Teknillinen korkeakoulu. 2008. 29 s.
- 53 Fisk, W. J.; De Almeida, A. T.; Sensor-based demand-controlled ventilation: a review. Energy and Buildings, 1998. Vol. 29, nro 1. s. 35-45.
- 54 Helsingin Energia. Kaukolämpömaksuhinnasto 1.3.2012 ja sähkön myyntihinnasto 1.3.2012 Helsingissä yrityksille ja yhteisöille. Saatavilla: <http://helen.fi/palvelut/hinnastot.html> [Viitattu 26.5.2012]

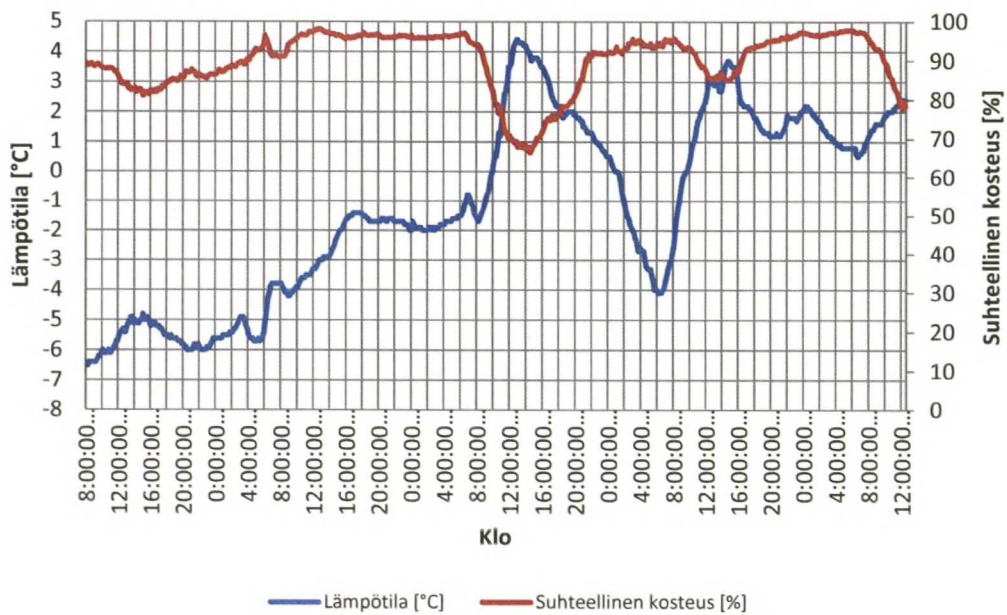
Liite 1 Ulkolämpötilan ja kosteuden mittaustulokset



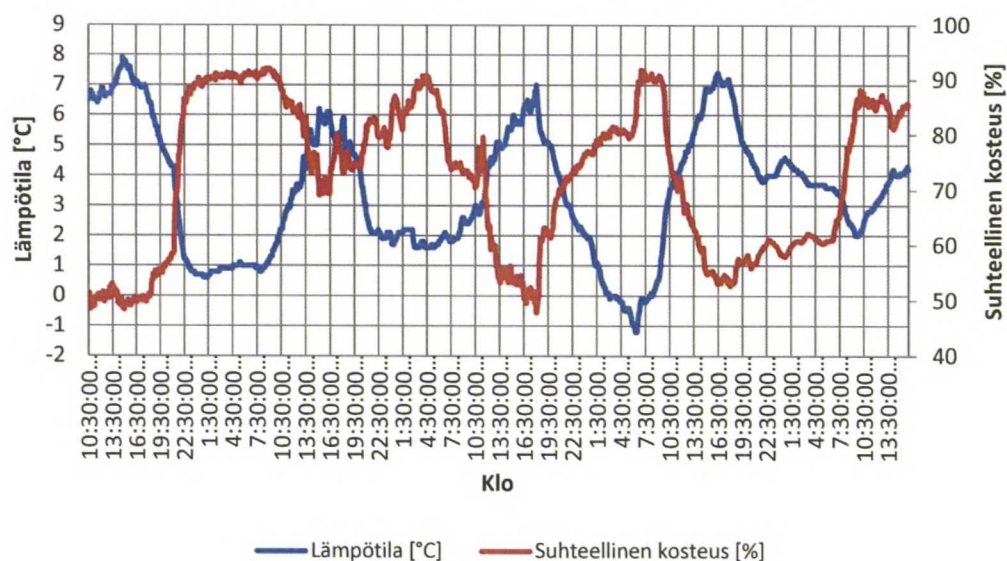
Ulkolämpötila ja suhteellinen kosteus 13.-17.2.2012



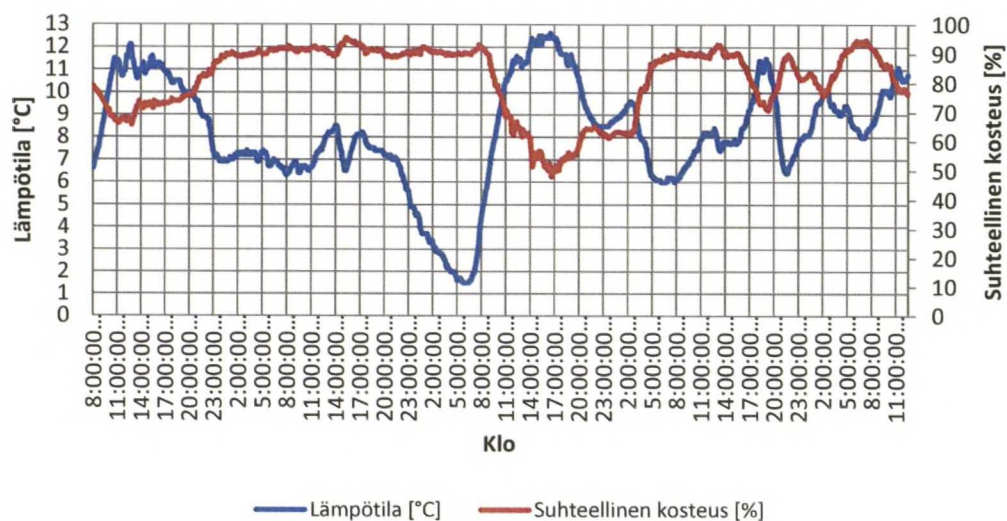
Ulkolämpötila ja suhteellinen kosteus 27.2.-2.3.2012



Ulkolämpötila ja suhteellinen kosteus 16.-20.4.2012



Ulkolämpötila ja suhteellinen kosteus 23.4.-27.4.2012



Liite 2 Ulkolämpötilojen esiintymistiheys nykyilmastos-
sa vyöhykkeillä I-II (Vantaa)

Ulkoilman lämpötilojen esiintymistiheys nykyilmastossa (TRY2012) pysyvyyssarvoina vyöhykkeillä I-II (Vantaa)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	vuosi	talvi	kesä	
	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8760	6552	2208	
-21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-21
-20	0.0027	0.0074	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0008	0.0011	0	-20
-19	0.0067	0.0238	0.0067	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.003	0.004	0	-19
-18	0.0202	0.0417	0.0081	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0056	0.0075	0	-18
-17	0.0309	0.0536	0.0094	0	0	0	0	0	0	0	0.0056	0	0.008	0.0107	0	-17
-16	0.0444	0.0729	0.0148	0	0	0	0	0	0	0	0.0097	0	0.0114	0.0153	0	-16
-15	0.0766	0.1086	0.0202	0	0	0	0	0	0	0	0.0139	0	0.0177	0.0237	0	-15
-14	0.0927	0.1682	0.0323	0	0	0	0	0	0	0	0.0361	0.0081	0.0272	0.0363	0	-14
-13	0.1089	0.2024	0.0376	0	0	0	0	0	0	0	0.0528	0.0242	0.0344	0.0459	0	-13
-12	0.1358	0.2292	0.0511	0	0	0	0	0	0	0	0.0722	0.0376	0.0426	0.0569	0	-12
-11	0.1492	0.2426	0.0591	0	0	0	0	0	0	0	0.0931	0.0538	0.0485	0.0649	0	-11
-10	0.1613	0.2649	0.0712	0	0	0	0	0	0	0	0.1042	0.0645	0.0541	0.0723	0	-10
-9	0.1868	0.2768	0.0806	0	0	0	0	0	0	0	0.1097	0.0793	0.0597	0.0798	0	-9
-8	0.2151	0.2932	0.1089	0	0	0	0	0	0	0	0.1264	0.0941	0.0684	0.0914	0	-8
-7	0.2567	0.3244	0.1599	0	0	0	0	0	0	0	0.1431	0.125	0.0826	0.1105	0	-7
-6	0.2796	0.369	0.2191	0	0	0	0	0	0	0	0.1681	0.1747	0.0993	0.1328	0	-6
-5	0.3199	0.4048	0.2728	0	0	0	0	0	0	0	0.1875	0.2567	0.1186	0.1586	0	-5
-4	0.3737	0.4405	0.3118	0	0	0	0	0	0	0	0.2111	0.3427	0.1385	0.1851	0	-4
-3	0.4261	0.4792	0.3723	0.0083	0	0	0	0	0	0	0.2319	0.4261	0.1605	0.2146	0	-3
-2	0.4718	0.5313	0.4422	0.0347	0	0	0	0	0	0.0013	0.2708	0.4866	0.1849	0.2473	0	-2
-1	0.5874	0.558	0.5	0.0694	0	0	0	0	0	0.0108	0.3028	0.5323	0.2119	0.2833	0	-1
0	0.6492	0.6265	0.6089	0.1097	0	0	0	0	0	0.0228	0.3528	0.6062	0.2463	0.3294	0	0
1	0.8266	0.7128	0.8011	0.1778	0.0081	0	0	0	0.0028	0.0484	0.4278	0.6801	0.3055	0.4084	0	1
2	0.9664	0.7798	0.914	0.3153	0.0188	0	0	0	0.0083	0.1022	0.4903	0.7675	0.3619	0.4838	0	2
3	1	0.8795	0.9637	0.4472	0.0309	0	0	0	0.0222	0.1976	0.5486	0.9073	0.4144	0.554	0	3
4	1	0.939	0.9812	0.5708	0.0457	0.0028	0	0	0.0514	0.3091	0.6167	0.9691	0.4548	0.6078	0.0009	4
5	1	0.9583	0.9879	0.6597	0.0685	0.0097	0	0	0.0903	0.3898	0.7069	1	0.4868	0.6497	0.0032	5
6	1	0.9866	0.9973	0.7278	0.1129	0.0167	0	0	0.1236	0.504	0.8181	1	0.5212	0.6951	0.0054	6
7	1	0.9926	1	0.7681	0.1895	0.0292	0	0.004	0.1833	0.6062	0.8944	1	0.553	0.7357	0.0109	7
8	1	0.9985	1	0.8111	0.2876	0.05	0.0027	0.017	0.2694	0.6882	0.9528	1	0.5872	0.7773	0.0231	8
9	1	1	1	0.8375	0.371	0.0861	0.0067	0.039	0.3597	0.7608	1	1	0.6192	0.8132	0.0435	9
10	1	1	1	0.8583	0.4785	0.1403	0.0215	0.067	0.4472	0.836	1	1	0.6517	0.8458	0.0756	10
11	1	1	1	0.8833	0.5632	0.2028	0.0336	0.121	0.5583	0.8831	1	1	0.6848	0.8758	0.1182	11
12	1	1	1	0.9111	0.6532	0.2764	0.0739	0.183	0.6361	0.9113	1	1	0.7183	0.9008	0.1766	12
13	1	1	1	0.9292	0.7191	0.3889	0.1156	0.23	0.7014	0.961	1	1	0.7517	0.9231	0.2432	13
14	1	1	1	0.9431	0.7782	0.4833	0.1828	0.31	0.7861	1	1	1	0.7885	0.9451	0.3238	14
15	1	1	1	0.9556	0.828	0.5819	0.2473	0.425	0.8514	1	1	1	0.8224	0.9592	0.4162	15
16	1	1	1	0.9625	0.8602	0.6681	0.3522	0.531	0.9111	1	1	1	0.8556	0.9702	0.5154	16
17	1	1	1	0.9778	0.9046	0.7528	0.4987	0.616	0.9556	1	1	1	0.8909	0.9818	0.6209	17
18	1	1	1	0.9889	0.9274	0.8097	0.6008	0.688	0.975	1	1	1	0.9148	0.9878	0.6984	18
19	1	1	1	1	0.9422	0.8611	0.6761	0.763	0.9917	1	1	1	0.9354	0.9925	0.7659	19
20	1	1	1	1	0.9583	0.9194	0.7608	0.813	1	1	1	1	0.9537	0.9953	0.8302	20
21	1	1	1	1	0.9704	0.9625	0.8441	0.867	1	1	1	1	0.9699	0.9966	0.8904	21
22	1	1	1	1	0.9879	0.9806	0.9059	0.902	1	1	1	1	0.9811	0.9986	0.9289	22
23	1	1	1	1	0.9933	0.9917	0.9328	0.925	1	1	1	1	0.9866	0.9992	0.9493	23
24	1	1	1	1	1	1	0.953	0.945	1	1	1	1	0.9913	1	0.9656	24
25	1	1	1	1	1	1	0.9772	0.96	1	1	1	1	0.9946	1	0.9787	25
26	1	1	1	1	1	1	0.9973	0.984	1	1	1	1	0.9984	1	0.9937	26
27	1	1	1	1	1	1	1	0.989	1	1	1	1	0.9991	1	0.9964	27
28	1	1	1	1	1	1	1	0.993	1	1	1	1	0.9994	1	0.9977	28
29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	29

Liite 3 Lämmöntarpeen huomioon ottavat vuorokautiset näennäiskäyntiajat (Helsinki-Vantaa 1979)

Taulukot L1.6 - L1.9. Lämmöntarpeen huomioon ottavat vuorokautiset näennäiskäyntiajat Δt_{wk} eri paikkakunnilla kuukausittain. Näennäiskäyntiaikoja käytetään ilmanvaihdon kuukausittaisen lämmöntarpeen määrittämisessä, kun ilmanvaihto on päällä osan aikaa vuorokaudesta tai sitä käytetään eri ilmavirroilla eri kellonaikoina. Päivällä käyttöaikoja kohti laskettu lämmöntarve on pienempi kuin yöllä. Taulukon arvot vastaavat huonelämpötilaa 21 °C. Lukuesimerkki: Jos ilmanvaihtoa käytetään Helsingissä huhtikuussa päivisin 12 tuntia klo 6 - 18, niin vuorokautinen näennäiskäyntiaika $\Delta t_{wk} = 17,90 \text{ h} - 6,81 \text{ h} = 11,09 \text{ h}$. Lämmöntarvetta vastaava käyntiajan muuntokerroin $r = 11,09 \text{ h} / 12 \text{ h} = 0,924$. Vastaavasti voidaan laskea myös kesäaikainen yöjähdytys.

Taulukko L1.6.		Vuorokautiset näennäiskäyntiajat Δt_{wk} kuukausittain sähvyöhykkeellä I. Helsinki-Vantaa, 1979.												
Kellonaika														
Kuukausi		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tammikuu		0	1.03	2.06	3.09	4.12	5.15	6.18	7.20	8.22	9.22	10.22	11.21	12.20
Helmikuu		0	1.02	2.05	3.09	4.13	5.18	6.23	7.29	8.35	9.39	10.42	11.43	12.41
Maaliskuu		0	1.02	2.05	3.08	4.12	5.16	6.21	7.25	8.29	9.31	10.32	11.31	12.29
Huhtikuu		0	1.11	2.24	3.37	4.52	5.68	6.81	7.91	8.97	9.98	10.95	11.88	12.78
Toukokuu		0	1.34	2.73	4.14	5.58	7.04	8.39	9.62	10.73	11.73	12.62	13.39	14.10
Kesäkuu		0	1.71	3.58	5.46	7.34	9.22	10.87	12.28	13.44	14.41	15.17	15.74	16.19
Heinäkuu		0	1.36	2.76	4.17	5.58	6.99	8.28	9.44	10.47	11.40	12.22	12.94	13.64
Elokuu		0	1.50	3.08	4.67	6.29	7.92	9.38	10.67	11.78	12.70	13.43	13.98	14.46
Syyskuu		0	1.17	2.37	3.59	4.83	6.10	7.31	8.46	9.56	10.56	11.48	12.30	13.09
Lokakuu		0	1.05	2.11	3.18	4.25	5.33	6.40	7.47	8.54	9.56	10.54	11.47	12.38
Marraskuu		0	1.01	2.02	3.04	4.05	5.06	6.07	7.09	8.12	9.13	10.14	11.14	12.12
Joulukuu		0	1.02	2.03	3.05	4.05	5.06	6.06	7.06	8.06	9.06	10.06	11.05	12.03
Koko vuosi		0	1.10	2.21	3.33	4.45	5.58	6.69	7.76	8.81	9.82	10.79	11.72	12.63
	Talvi	0	1.06	2.13	3.20	4.28	5.37	6.44	7.50	8.55	9.56	10.55	11.51	12.45
	Kesä	0	1.51	3.11	4.71	6.33	7.95	9.40	10.67	11.77	12.71	13.48	14.10	14.66
Kellonaika														
Kuukausi		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Tammikuu		12.20	13.17	14.14	15.11	16.08	17.05	18.02	19.00	19.99	20.98	21.98	22.99	24.00
Helmikuu		12.41	13.36	14.29	15.22	16.15	17.09	18.04	19.01	20.00	20.99	21.99	22.99	24.00
Maaliskuu		12.29	13.25	14.19	15.14	16.08	17.02	17.98	18.96	19.95	20.95	21.96	22.98	24.00
Huhtikuu		12.78	13.65	14.50	15.34	16.18	17.02	17.90	18.83	19.80	20.80	21.84	22.91	24.00
Toukokuu		14.10	14.75	15.35	15.95	16.55	17.15	17.84	18.62	19.50	20.47	21.56	22.75	24.00
Kesäkuu		16.19	16.55	16.80	17.05	17.30	17.56	17.93	18.40	18.99	19.86	21.00	22.41	24.00
Heinäkuu		13.64	14.30	14.93	15.57	16.24	16.92	17.68	18.50	19.40	20.40	21.51	22.73	24.00
Elokuu		14.46	14.87	15.22	15.60	16.01	16.46	17.06	17.82	18.74	19.83	21.08	22.51	24.00
Syyskuu		13.09	13.85	14.58	15.32	16.07	16.84	17.68	18.61	19.61	20.65	21.73	22.85	24.00
Lokakuu		12.38	13.28	14.15	15.04	15.94	16.86	17.81	18.79	19.79	20.82	21.87	22.93	24.00
Marraskuu		12.12	13.10	14.06	15.03	16.00	16.99	17.97	18.97	19.97	20.98	21.98	22.99	24.00
Joulukuu		12.03	13.00	13.96	14.94	15.93	16.93	17.93	18.94	19.95	20.96	21.97	22.99	24.00
Koko vuosi		12.63	13.52	14.38	15.25	16.12	17.00	17.91	18.85	19.82	20.82	21.86	22.92	24.00
	Talvi	12.45	13.37	14.27	15.18	16.09	17.00	17.94	18.90	19.89	20.89	21.91	22.95	24.00
	Kesä	14.66	15.15	15.58	16.03	16.49	16.97	17.56	18.26	19.07	20.06	21.23	22.57	24.00

Liite 4 Keskitetyn järjestelmän vuosihyötysuhde- ja tu-
 loilman jälkilämmitystarvelaskelma

Keskitetyn IV-järjestelmän ilmanvaihdon LTO:n vuosihyötysuhde ja energiankulutus

ρ_i

1,2 kg/m³

c_{pi}

1000 J/kg°C

t_i

18 °C

t_s

21 °C

$\eta_{t,s}$

80,5 %

Jäteilmarajoitus

0 °C

$Q_{v,i}$

2,964 m³/s

Ilmavirtojen suhde

1 (tulo/poisto)

t_d

0,417 h/24 h

t_v

0,714 vrk/7 vrk

r

0,786 lämmöntarvetta vastaava käyntiajan muutokerroin

S_i = sisäilman lämpötilan ja ulkoilman lämpötilan välinen astepäiväluku

S_i = LTO:n jälkeisen lämpötilan ja ulkoilman lämpötilan välinen astepäiväluku

S_i = Sisäilman lämpötilan ja jäteilman lämpötilan välinen astepäiväluku

$Q_{il, patteri} = \rho \cdot c_p \cdot Q_{v,i} \cdot t_d \cdot t_v \cdot (t_i - t_{d,i} - \eta_{a,i} \cdot (t_s - t_{d,i})) \Delta t / 1000$ (Tuloilman lämmittäminen LTO:n jälkeen sisäänpuhalluslämpötilaan)

$Q_{w, sp} = \rho \cdot c_p \cdot Q_{v,i} \cdot t_d \cdot t_v \cdot (t_s - t_{d,i}) \Delta t / 1000$ (Sisäänpuhallusilman lämmittäminen huonelämpötilaan 18 °C -> 21 °C)

$t_{v,i}$ [°C]	% vuodesta	t_i [°C]	t_s [°C]	$t_{i,s}$ [°C]	$\eta_{t,p, max}$	$\eta_{t,p, rajoitettu}$	$\eta_{t,s, rajoitettu}$	t_{iLTO} [°C]	S_i [Kd]	S_i [Kd]	S_i [Kd]	$Q_{il, patteri}$ [kWh]	$Q_{w, sp}$ [kWh]
-21	0,000 %	18	21	0	0,805	0,500	0,500	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-20	0,080 %	18	21	0	0,805	0,512	0,512	1	11,97	6,13	6,13	39,55	17,49
-19	0,300 %	18	21	0	0,805	0,525	0,525	2	32,12	16,86	16,86	104,93	48,09
-18	0,560 %	18	21	0	0,805	0,538	0,538	3	37,01	19,93	19,93	119,48	56,84
-17	0,800 %	18	21	0	0,805	0,553	0,553	4	33,29	18,40	18,40	106,12	52,47
-16	1,140 %	18	21	0	0,805	0,568	0,568	5	45,92	26,06	26,06	144,42	74,33
-15	1,770 %	18	21	0	0,805	0,583	0,583	6	82,78	48,29	48,29	256,65	137,73
-14	2,720 %	18	21	0	0,805	0,600	0,600	7	121,36	72,82	72,82	370,50	207,68
-13	3,440 %	18	21	0	0,805	0,618	0,618	8	89,35	55,19	55,19	268,28	157,40
-12	4,260 %	18	21	0	0,805	0,636	0,636	9	98,77	62,85	62,85	291,28	179,26
-11	4,850 %	18	21	0	0,805	0,656	0,656	10	68,91	45,22	45,22	199,32	128,98
-10	5,410 %	18	21	0	0,805	0,677	0,677	11	63,36	42,92	42,92	179,45	122,42
-9	5,970 %	18	21	0	0,805	0,700	0,700	12	61,32	42,92	42,92	169,71	122,42
-8	6,840 %	18	21	0	0,805	0,724	0,724	13	92,09	66,69	66,69	248,53	190,19
-7	8,260 %	18	21	0	0,805	0,750	0,750	14	145,12	108,84	108,84	380,95	310,43
-6	9,930 %	18	21	0	0,805	0,778	0,778	15	164,58	128,01	128,01	418,98	365,08
-5	11,860 %	18	21	0,07	0,805	0,805	0,805	15,93	183,16	147,44	147,44	450,65	421,92
-4	13,850 %	18	21	0,875	0,805	0,805	0,805	16,125	181,59	146,18	146,18	430,06	435,04
-3	16,050 %	18	21	1,68	0,805	0,805	0,805	16,32	192,72	155,14	155,14	437,18	480,95
-2	18,490 %	18	21	2,485	0,805	0,805	0,805	16,515	204,84	164,89	164,89	442,45	533,42
-1	21,190 %	18	21	3,29	0,805	0,805	0,805	16,71	216,81	174,53	174,53	442,64	590,26
0	24,630 %	18	21	4,095	0,805	0,805	0,805	16,905	263,68	212,26	212,26	504,14	752,03
1	30,550 %	18	21	4,9	0,805	0,805	0,805	17,1	432,16	347,89	347,89	764,66	1294,19
2	36,190 %	18	21	5,705	0,805	0,805	0,805	17,295	391,13	314,86	314,86	630,42	1232,98
3	41,440 %	18	21	6,51	0,805	0,805	0,805	17,49	344,93	277,66	277,66	495,53	1147,72
4	45,480 %	18	21	7,315	0,805	0,805	0,805	17,685	250,68	201,80	201,80	311,07	883,20
5	48,680 %	18	21	8,12	0,805	0,805	0,805	17,88	186,88	150,44	150,44	190,75	699,56
6	52,120 %	18	21	9	0,805	0,800	0,800	18	188,34	150,67	150,67	145,24	752,03
7	55,300 %	18	21	10	0,805	0,786	0,786	18	162,50	127,68	127,68	78,96	695,19
8	58,720 %	18	21	11	0,805	0,769	0,769	18	162,28	124,83	124,83	25,45	747,66
9	61,920 %	18	21	12	0,805	0,750	0,750	18	140,16	105,12	105,12	0,00	699,56
10	65,170 %	18	21	13	0,805	0,727	0,727	18	130,49	94,90	94,90	0,00	710,49
11	68,480 %	18	21	14	0,805	0,700	0,700	18	120,82	84,57	84,57	0,00	723,61
12	71,830 %	18	21	15	0,805	0,667	0,667	18	110,05	73,37	73,37	0,00	732,35
Yhteensä									5011,16	3815,37	3815,37	8647,36	15702,97

Vuosihyötysuhteet

Tuloilma $\eta_{a,t}$ =

76,14

%

Poistoilma $\eta_{a,p}$ =

76,14

%

Liite 5 Tilakohtaisen ilmastointikoneen vuosihyötysuhde- ja tuloilman jälkilämmitystarvelaskelma

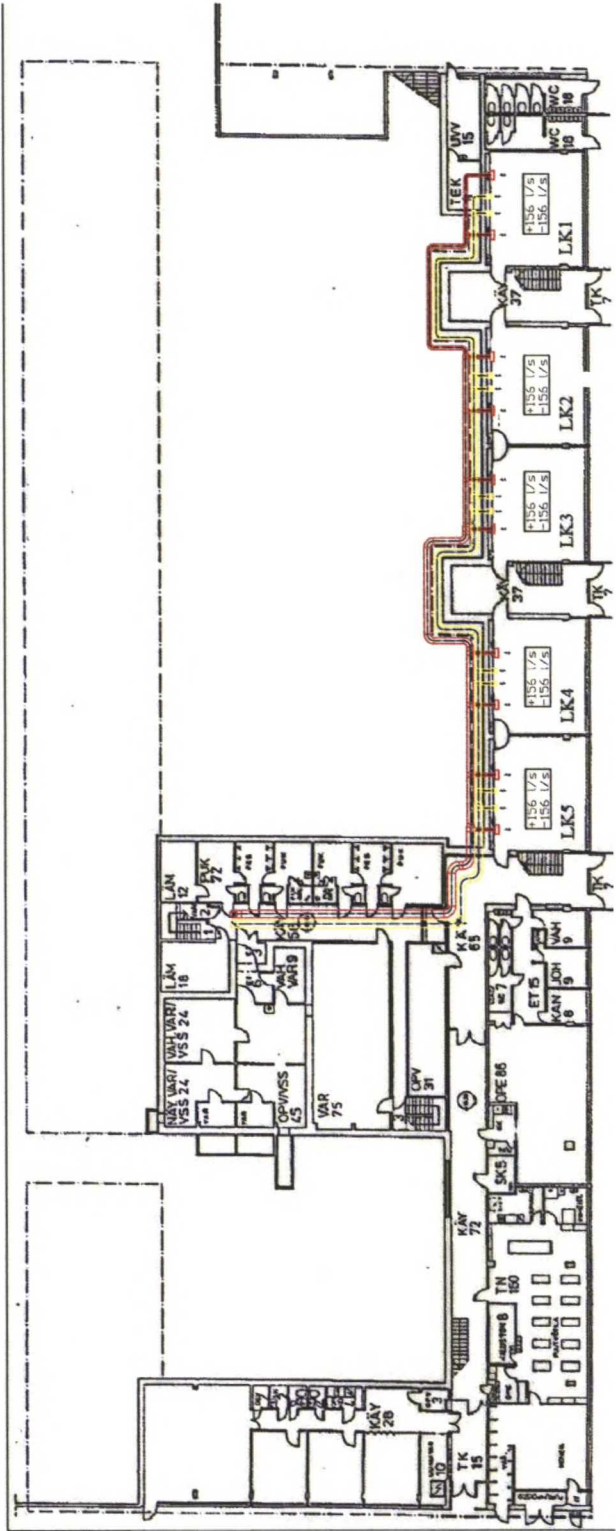
Tilakohtaisen IV-koneen ilmanvaihdon LTO:n vuosihyötysuhde ja tuloilman jälkilämmityksen energiankulutus konetta kohti														
ρ_i	1,2 kg/m³	S_s = sisäilman lämpötilan ja ulkoilman lämpötilan välinen astepäiväluku												
c_{pi}	1000 J/kg°C	S_t = LTO:n jälkeisen lämpötilan ja ulkoilman lämpötilan välinen astepäiväluku												
t_{sp}	18 °C	S_j = Sisäilman lämpötilan ja jäteilman lämpötilan välinen astepäiväluku												
t_s	21 °C	$Q_{g, \text{patteri}} = \rho_i c_{pi} q_{iv} t_{sp} (t_{sp} - t_{u,i}) \eta_{Ls} / 1000$ (Tuloilman lämmittäminen LTO:n jälkeen sisäänpuhalluslämpötilaan)												
η_{Ls}	85 %	$Q_{u, sp} = \rho_i c_{pi} q_{iv} t_{sp} (t_s - t_{sp}) \Delta t / 1000$ (Sisäänpuhallusilman lämmittäminen huonelämpötilaan 18 °C -> 21 °C)												
Jäteilmarajoitus	0 °C													
$q_{v,t}$	0,156 m³/s													
Ilmavirtojen suhde	1 (tulo/poisto)													
t_d	0,417 h/24 h													
t_v	0,714 vrk/7 vrk													
r	0,786 lämmöntarvetta vastaava käyntiajan muuntokerroin													
t_u [°C]	% vuodesta	t_{sp} [°C]	t_s [°C]	t_i [°C]	$\eta_{Ls, p \text{ rajoitettu}}$	$\eta_{Ls, rajoitettu}$	η_{Ls}	t_{LTO} [°C]	S_s [Kd]	S_t [Kd]	S_j [Kd]	$Q_{g, \text{patteri}}$ [kWh]	$Q_{u, sp}$ [kWh]	
-21	0,000 %	18	21	0	0,85	0,500	0,500	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
-20	0,080 %	18	21	0	0,85	0,512	0,512	1	11,97	6,13	6,13	1,84	0,92	
-19	0,300 %	18	21	0	0,85	0,525	0,525	2	32,12	16,86	16,86	4,87	2,53	
-18	0,560 %	18	21	0	0,85	0,538	0,538	3	37,01	19,93	19,93	5,54	2,99	
-17	0,800 %	18	21	0	0,85	0,553	0,553	4	33,29	18,40	18,40	4,91	2,76	
-16	1,140 %	18	21	0	0,85	0,568	0,568	5	45,92	26,06	26,06	6,68	3,91	
-15	1,770 %	18	21	0	0,85	0,583	0,583	6	82,78	48,29	48,29	11,84	7,25	
-14	2,720 %	18	21	0	0,85	0,600	0,600	7	121,36	72,82	72,82	17,05	10,93	
-13	3,440 %	18	21	0	0,85	0,618	0,618	8	89,35	55,19	55,19	12,32	8,28	
-12	4,260 %	18	21	0	0,85	0,636	0,636	9	98,77	62,85	62,85	13,34	9,43	
-11	4,850 %	18	21	0	0,85	0,656	0,656	10	68,91	45,22	45,22	9,10	6,79	
-10	5,410 %	18	21	0	0,85	0,677	0,677	11	63,36	42,92	42,92	8,17	6,44	
-9	5,970 %	18	21	0	0,85	0,700	0,700	12	61,32	42,92	42,92	7,70	6,44	
-8	6,840 %	18	21	0	0,85	0,724	0,724	13	92,09	66,69	66,69	11,22	10,01	
-7	8,260 %	18	21	0	0,85	0,750	0,750	14	145,12	108,84	108,84	17,12	16,34	
-6	9,930 %	18	21	0	0,85	0,778	0,778	15	164,58	128,01	128,01	18,73	19,21	
-5	11,860 %	18	21	0	0,85	0,808	0,808	16	183,16	147,93	147,93	20,03	22,21	
-4	13,850 %	18	21	0	0,85	0,840	0,840	17	181,59	152,53	152,53	18,97	22,90	
-3	16,050 %	18	21	0,6	0,85	0,850	0,850	17,4	192,72	163,81	163,81	19,12	25,31	
-2	18,490 %	18	21	1,45	0,85	0,850	0,850	17,55	204,84	174,11	174,11	19,16	28,07	
-1	21,190 %	18	21	2,3	0,85	0,850	0,850	17,7	216,81	184,29	184,29	18,93	31,07	
0	24,630 %	18	21	3,15	0,85	0,850	0,850	17,85	263,68	224,12	224,12	21,22	39,58	
1	30,550 %	18	21	4	0,85	0,850	0,850	18	432,16	367,34	367,34	31,53	68,12	
2	36,190 %	18	21	5	0,85	0,842	0,842	18	391,13	329,38	329,38	25,29	64,89	
3	41,440 %	18	21	6	0,85	0,833	0,833	18	344,93	287,44	287,44	19,13	60,41	
4	45,480 %	18	21	7	0,85	0,824	0,824	18	250,68	206,44	206,44	11,32	46,48	
5	48,680 %	18	21	8	0,85	0,813	0,813	18	186,88	151,84	151,84	6,27	36,82	
6	52,120 %	18	21	9	0,85	0,800	0,800	18	188,34	150,67	150,67	3,85	39,58	
7	55,300 %	18	21	10	0,85	0,786	0,786	18	162,50	127,68	127,68	0,88	36,59	
8	58,720 %	18	21	11	0,85	0,769	0,769	18	162,28	124,83	124,83	0,00	39,35	
9	61,920 %	18	21	12	0,85	0,750	0,750	18	140,16	105,12	105,12	0,00	36,82	
10	65,170 %	18	21	13	0,85	0,727	0,727	18	130,49	94,90	94,90	0,00	37,39	
11	68,480 %	18	21	14	0,85	0,700	0,700	18	120,82	84,57	84,57	0,00	38,08	
12	71,830 %	18	21	15	0,85	0,667		18	110,05	73,37	73,37	0,00	38,54	
Yhteensä								5011,16	3911,51	3911,51		366,14	826,47	
Vuosihyötysuhteet														
Tuloilma $\eta_{a,t}$ =		78,06	%											
Poistoilma $\eta_{a,p}$ =		78,06	%											

Liite 6 Koneellisen poistoilmanvaihdon tuloilman jälki- lämmitystarvelaskelma

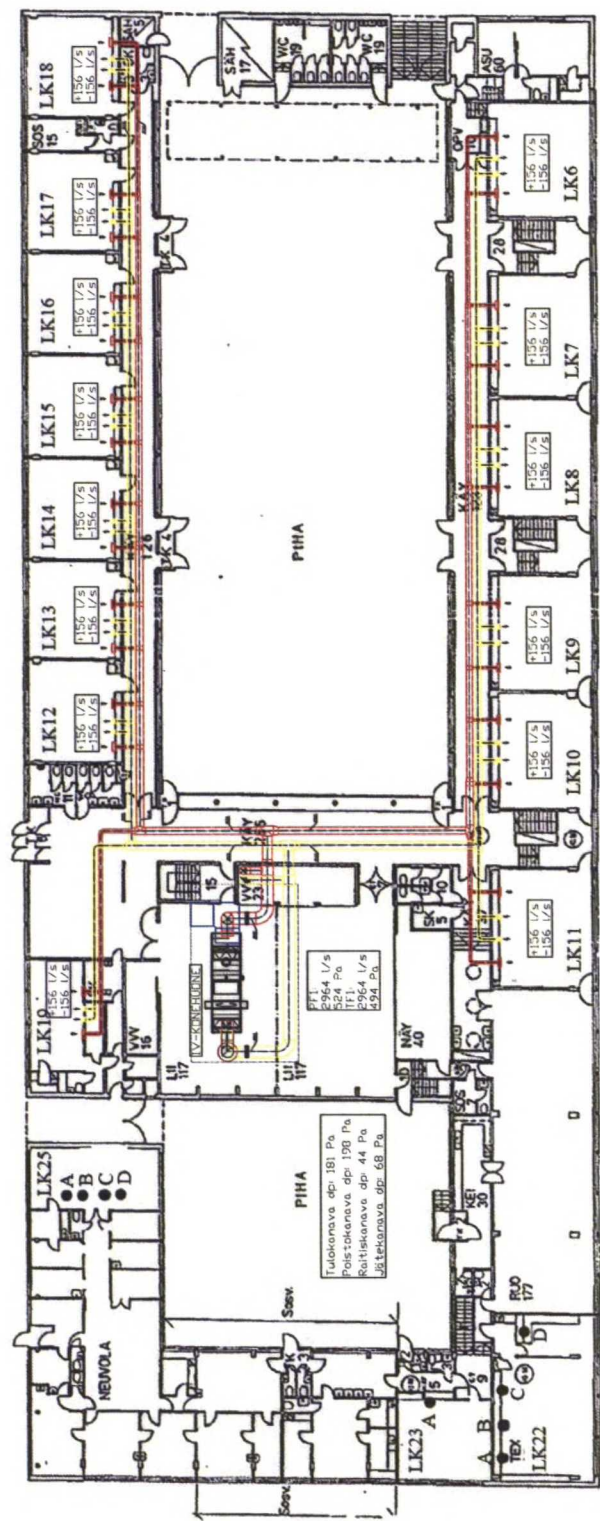
Koneellisen poistojärjestelmän ilmanvaihdon energiankulutus 1/1 ja 1/2-tehoilla			
ρ_i	1,2 kg/m ³	$S_{s, 1/2}$	= sisäilman lämpötilan ja ulkoilman lämpötilan välinen astepäiväluku, täysi teho
c_{pi}	1000 J/kg°C	$S_{s, 1/2}$	= sisäilman lämpötilan ja ulkoilman lämpötilan välinen astepäiväluku, puoliteho
t_a	21 °C	$Q_{w, 1/2}$	= $\rho_i c_{pi} Q_{v,i} t_a (t_i - t_a) \Delta t / 1000$ (Tuloilman lämmittäminen sisälämpötilaan, täysi teho)
$Q_{v,1,1/1}$	1,258 m ³ /s	$Q_{w, 1/2}$	= $\rho_i c_{pi} Q_{v,i} t_a (t_i - t_a) \Delta t / 1000$ (Tuloilman lämmittäminen sisälämpötilaan, puoliteho)
$Q_{v,1,1/2}$	0,665 m ³ /s		
t_d	0,417 h/24 h		
t_v	0,714 vrk/7 vrk		
r	0,786 lämmöntarvetta vastaava käyntiajan muuntokerroin		

Tunteja/kk	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744						
t_a [°C]	Tamm	Helmi	Maalis	Huhti	Touko	Kesä	Heinä	Elo	Syys	Loka	Marras	Joulu	t_i [°C]	$S_{s, 1/2}$ [Kh]	$S_{s, 1/2}$ [Kh]	$Q_{w, 1/2}$ [kWh]	$Q_{w, 1/2}$ [kWh]	
-21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0,0	0,0	0,000	0,00	
-20	0,0027	0,0074	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0,0	286,2	0,000	53,42	
-19	0,0067	0,0238	0,0067	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0,0	759,3	0,000	141,71	
-18	0,0202	0,0417	0,0081	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0,0	901,5	0,000	168,24	
-17	0,0309	0,0536	0,0094	0	0	0	0	0	0	0	0,0056	0	21	153,2	643,1	54,095	120,03	
-16	0,0444	0,0729	0,0148	0	0	0	0	0	0	0	0,0097	0	21	109,2	1000,2	38,563	186,66	
-15	0,0766	0,1086	0,0202	0	0	0	0	0	0	0,0139	0	0	21	108,9	1870,7	38,436	349,14	
-14	0,0927	0,1682	0,0323	0	0	0	0	0	0	0	0,0361	0,0081	21	559,4	2347,0	197,518	438,04	
-13	0,1089	0,2024	0,0376	0	0	0	0	0	0	0	0,0528	0,0242	21	408,8	1732,5	144,338	323,35	
-12	0,1358	0,2292	0,0511	0	0	0	0	0	0	0	0,0722	0,0376	21	460,9	1915,2	162,743	357,45	
-11	0,1492	0,2426	0,0591	0	0	0	0	0	0	0	0,0931	0,0538	21	481,5	1183,3	170,013	220,85	
-10	0,1613	0,2649	0,0712	0	0	0	0	0	0	0	0,1042	0,0645	21	247,8	1269,5	87,472	236,93	
-9	0,1868	0,2768	0,0806	0	0	0	0	0	0	0	0,1097	0,0793	21	118,8	1349,2	41,944	251,81	
-8	0,2151	0,2932	0,1089	0	0	0	0	0	0	0	0,1264	0,0941	21	348,7	1860,1	123,112	347,17	
-7	0,2567	0,3244	0,1599	0	0	0	0	0	0	0	0,1431	0,125	21	336,7	3159,8	118,867	589,73	
-6	0,2796	0,369	0,2191	0	0	0	0	0	0	0	0,1681	0,1747	21	486,0	3456,8	171,589	645,17	
-5	0,3199	0,4048	0,2728	0	0	0	0	0	0	0	0,1875	0,2567	21	363,2	4030,0	128,221	752,15	
-4	0,3737	0,4405	0,3118	0	0	0	0	0	0	0	0,2111	0,3427	21	424,8	3925,4	149,981	732,63	
-3	0,4261	0,4792	0,3723	0,0083	0	0	0	0	0	0	0,2319	0,4261	21	502,8	4129,3	177,537	770,67	
-2	0,4718	0,5313	0,4422	0,0347	0	0	0	0	0	0,0013	0,2708	0,4866	21	1103,6	3818,7	389,646	712,70	
-1	0,5874	0,558	0,5	0,0694	0	0	0	0	0	0,0108	0,3028	0,5323	21	1212,0	3981,0	427,922	742,99	
0	0,6492	0,6265	0,6089	0,1097	0	0	0	0	0	0,0228	0,3528	0,6062	21	1552,8	4788,3	548,246	893,67	
1	0,8266	0,7128	0,8011	0,1778	0,0081	0	0	0	0,0028	0,0484	0,4278	0,6801	21	2602,4	7759,2	918,819	1448,13	
2	0,9664	0,7798	0,914	0,3153	0,0188	0	0	0	0,0083	0,1022	0,4903	0,7675	21	3723,0	5663,1	1314,460	1056,94	
3	1	0,8795	0,9637	0,4472	0,0309	0	0	0	0,0222	0,1976	0,5486	0,9073	21	4084,8	4193,7	1442,186	782,70	
4	1	0,939	0,9812	0,5708	0,0457	0,0028	0	0	0,0514	0,3091	0,6167	0,9691	21	4301,3	1682,7	1518,618	314,05	
5	1	0,9583	0,9879	0,6597	0,0685	0,0097	0	0	0,0903	0,3898	0,7069	1	21	3743,4	655,1	1321,667	122,27	
6	1	0,9866	0,9973	0,7278	0,1129	0,0167	0	0	0,1236	0,504	0,8181	1	21	4066,1	390,2	1435,577	72,82	
7	1	0,9926	1	0,7681	0,1895	0,0292	0	0,004	0,1833	0,6062	0,8944	1	21	3681,1	84,6	1299,680	15,78	
8	1	0,9985	1	0,8111	0,2876	0,05	0,0027	0,017	0,2694	0,6882	0,9528	1	21	3622,7	51,5	1279,031	9,62	
9	1	1	1	0,8375	0,371	0,0861	0,0067	0,039	0,3597	0,7608	1	1	21	3005,3	12,1	1061,055	2,26	
10	1	1	1	0,8583	0,4785	0,1403	0,0215	0,067	0,4472	0,836	1	1	21	2582,1	0,0	911,647	0,00	
11	1	1	1	0,8833	0,5632	0,2028	0,0336	0,121	0,5583	0,8831	1	1	21	2362,3	0,0	834,032	0,00	
12	1	1	1	0,9111	0,6532	0,2764	0,0739	0,183	0,6361	0,9113	1	1	21	1890,9	0,0	667,611	0,00	
													Yhteensä	48644,6	68899,5	17174,6	12859,1	

Liite 7 Keskitetyn järjestelmän ilmastointisuunnitelma
(1/2)



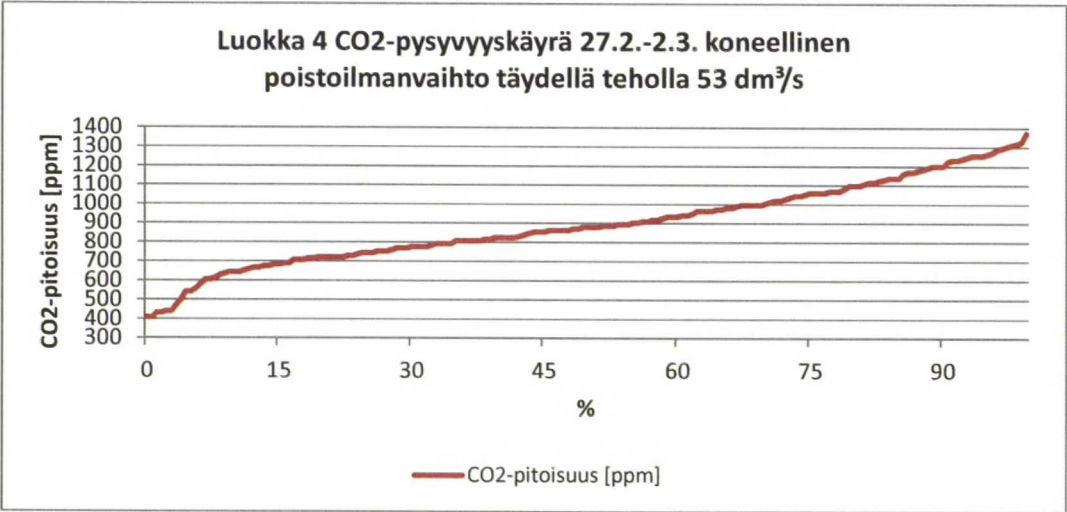
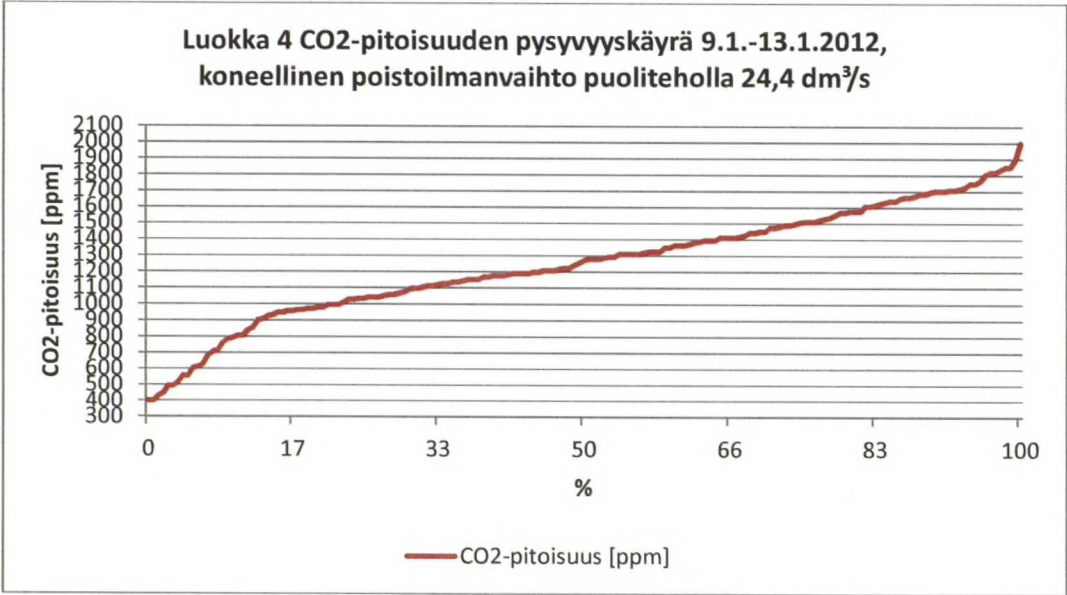
Liite 7 Keskitetyn järjestelmän ilmastointisuunnitelma
 (2/2)



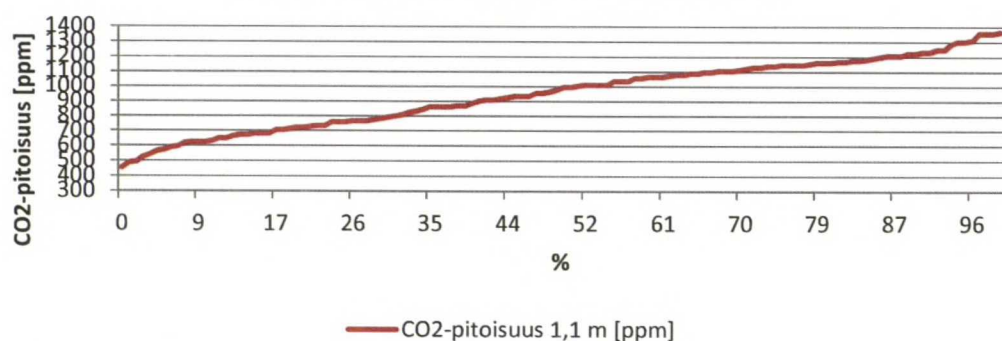
Liite 8 Ilmastointikoneiden ja poistoilmapuhaltimien laskennassa käytetyt tiedot

Puhaltimien tiedot	Puhallin	Ilmavirta [m³/s]	SFP [kW/(m³/s)]	Käyntiaika [h/a]
Hajautettu (Compact Air 02)	Tulo	0,156	0,43	2607
	Poisto	0,156	0,39	2607
Keskitetty (Gold-D)	Tulo	2,964	0,76	2607
	Poisto	2,964	0,86	2607
Koneellinen poistojärjestelmä 1/1-teho	Poisto yht.	1,26	2,48	1743
Koneellinen poistojärjestelmä 1/2-teho	Poisto yht.	0,69	1,20	864

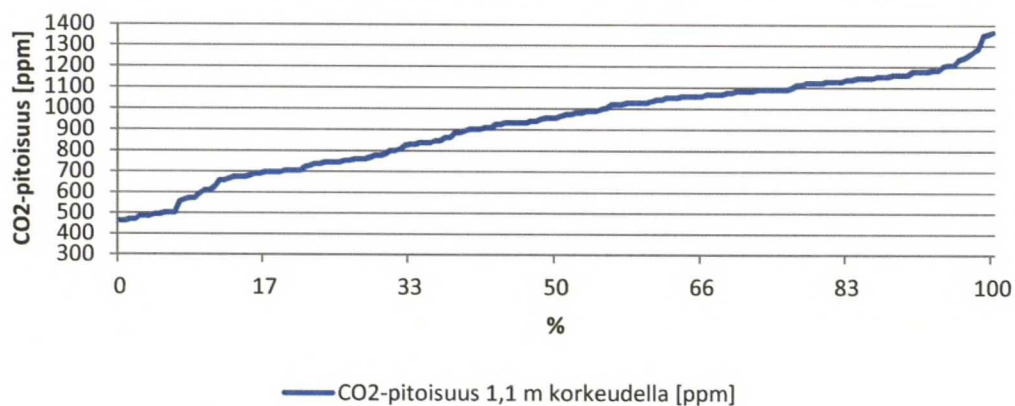
Liite 9 Hiilidioksidipitoisuuden pysyvyydet



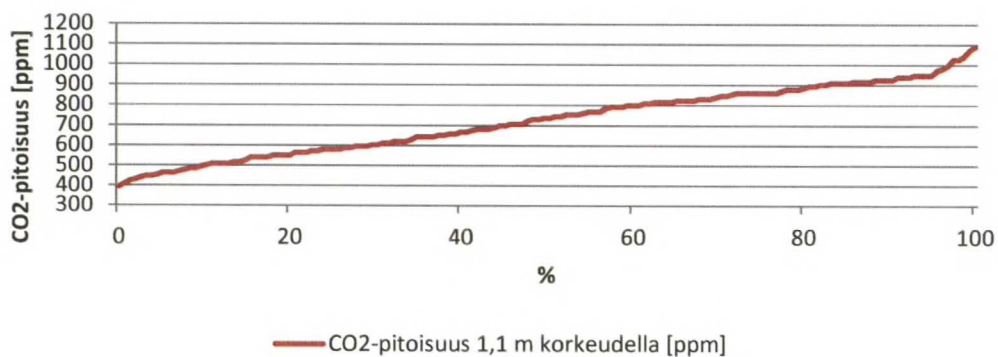
- **Luokka 4 CO₂-pysyvyyskäyrä 23.-27.4. koneellinen poistoilmanvaihto täydellä teholla 52,2 dm³/s**



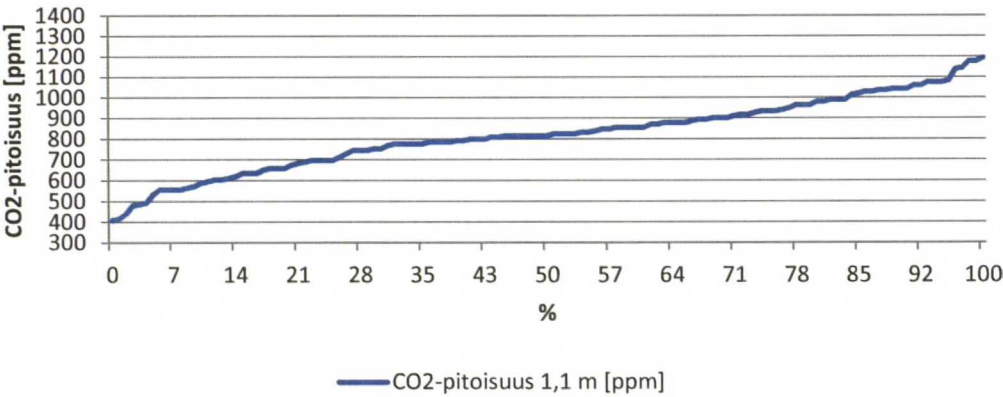
- **Luokka 4 CO₂-pitoisuuden pysyvyyskäyrä 6.-10.2., tilakohtainen ilmastointikone tarpeenmukaisella ohjauksella max. 180 dm³/s**



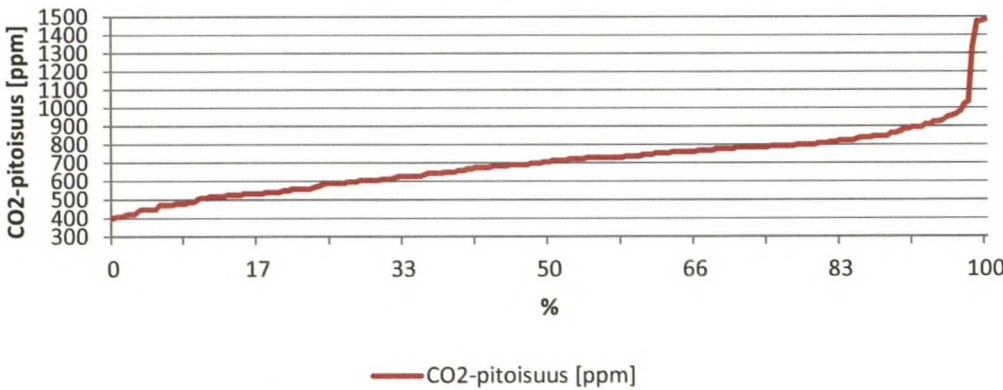
- **Luokka 4 CO₂-pitoisuuden pysyvyyskäyrä 13.-17.2. tilakohtainen ilmastointikone tarpeenmukaisella ohjauksella max. 200 dm³/s**



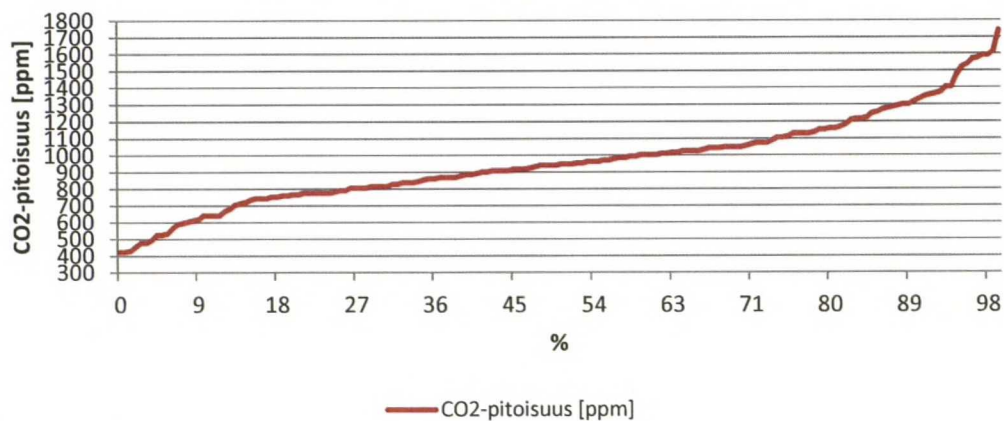
**Luokka 4 CO₂-pysyvyyskäyrä 16.-20.4. tilakohtainen
ilmastointikone vakioilmavirralla 140 dm³/s**



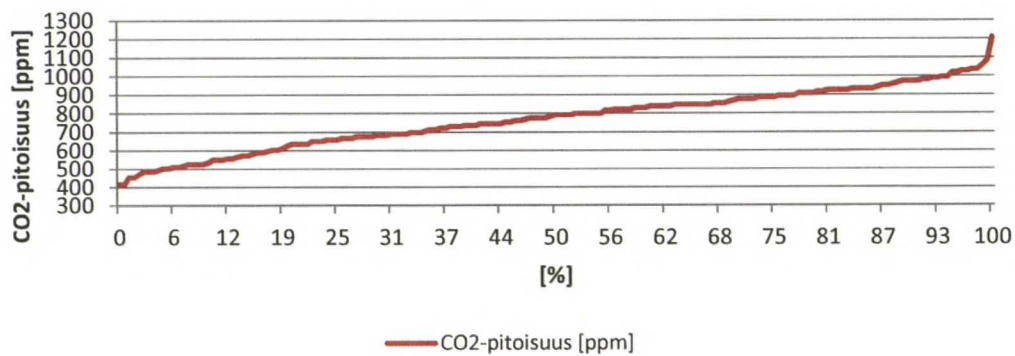
**Luokka 5 CO₂-pitoisuuden pysyvyyskäyrä 9.-13.1., tilakohtainen
ilmastointikone tarpeenmukaisella ohjauksella max. 160 dm³/s**



**Luokka 5 CO2-pysyvyyssäyrä 13.-17.2. koneellinen
poistoilmanvaihto puoliteholla 33 dm³/s**



**Luokka 5 CO2-pysyvyyssäyrä 27.2.-2.3. koneellinen
poistoilmanvaihto täydellä teholla 67,8 dm³/s**



TEKNILLINEN KORKEAKOULU
LVI-kiijasto
PL 4100 (Otakaari 4)
02015 TKK
puh. 09-451 3601